

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO FLUXO DE FLUIDO LUBRI-
REFRIGERANTE EM TUBEIRAS DO TIPO SAPATA PARA A RETIFICAÇÃO EM
ALTA VELOCIDADE**

TESE SUBMETIDA À UNIVESIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

JÂNIO RODRIGUES LOPES

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2007.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO FLUXO DE FLUIDO LUBRI-REFRIGERANTE
EM TUBEIRAS DO TIPO SAPATA PARA A RETIFICAÇÃO EM ALTA VELOCIDADE

JÂNIO RODRIGUES LOPES

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO FABRICAÇÃO
SENDO APROVADA EM SUA FORMA FINAL.

Prof. Dr. –Ing. Walter Lindolfo Weingaertner - Orientador

Prof. Fernando Cabral, Ph. D. - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. –Ing. Walter Lindolfo Weingaertner

Prof. Dr. –Ing. Joel Martins Crichigno Filho

Prof. Cleiton Rodrigues Teixeira Dr. Eng.

Prof. Rodrigo Lima Stoeterau Dr. Eng.

Prof. Dr. Júlio César Passos

Aos meus pais, Bráulio e Ida

A minha esposa, Zelita

Aos meus filhos, Ida Carolina, Mateus e Priscila

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, coordenador do LMP – Laboratório de Mecânica de Precisão, pelo apoio e orientação deste trabalho, pela confiança, pelo incentivo e pelo exemplo de capacidade técnica.

Ao Prof. Rodrigo Lima Stoeterau, Dr. Eng., pelo apoio e sugestões para realização deste trabalho.

Aos professores da Gerência de Metal Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica e em especial aos professores André Roberto de Souza, Nelson Bonacorso, Valdir Noll, Cláudio Losekan, Milton Pereira, Widomar Carpes, Marcelo Vandresen, Hélio Ormeu Ribeiro, Eloy João Losso, Zízimo Moreira Filho e Paulo Livramento pelo apoio, incentivo e auxílio na realização deste trabalho.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina (CEFETSC) pelo apoio dado através da redução de carga horária para realização do curso de doutorado.

A Gerência de Metal Mecânica do CEFETSC, pelos seus representantes, gerente Prof. Bernardo Rachadel e Coordenadora Silvana Lisboa de Sá, pelo incentivo e ajuda na aquisição de materiais utilizados nos ensaios.

Ao Laboratório de Máquinas Ferramentas do CEFETSC, na representação do Prof. Manoel Alfredo Pereira, pelo apoio irrestrito e incondicional no fornecimento de equipamentos e ferramentas para realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), seus funcionários Fernando e Sérgio, mestrando Felipe e estagiário Gustavo Nakagava.

A mamãe, que tanto na terra como no céu, está e sempre estará zelando pelos seus.

Ao meu pai Bráulio e a Tereza, pelo apoio irrestrito em todos os momentos.

Aos meus irmãos e familiares.

À Zelita, minha esposa, e aos meus filhos Idos Carolina, Mateus e Priscila, pelo apoio, paciência e incentivo de continuar nos momentos mais difíceis.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de realização deste trabalho.

A todos que, de uma forma direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS	13
SIMBOLOGIA	15
RESUMO.....	19
ABSTRACT	20
1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Estruturação e condução do trabalho de pesquisa	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Caracterização do processo de retificação	25
2.2 Cinemática do processo de retificação	27
2.3 Processo de retificação externa de mergulho	30
2.4 Influência da velocidade de corte sobre o resultado de trabalho	32
2.4.1 A evolução do processo de retificação com o aumento da velocidade de corte..	35
2.5 Ferramentas de corte para o processo de retificação	37
2.5.1 Materiais abrasivos	39
2.5.2 Ligantes	44
2.5.3 Estrutura do rebolo	47
2.5.4 Desgaste do rebolo	48
2.5.5 Condicionamento do rebolo	50
2.6 Sistema de refrigeração no processo de retificação	54
2.6.1 Fluido de corte	55
2.6.2 Propriedades e características do fluido de corte para retificação	58
2.6.3 Aditivção do fluido de corte	61
2.6.4 Quantidade mínima de fluido de corte na retificação	62
2.6.5 Refrigeração na retificação com CBN	63
2.6.6 Influência do fluido de corte na retificação	67
2.6.7 Estratégia para aplicação de fluido de corte no processo de retificação	70
2.7 Desafios a serem superados no aprimoramento do sistema de refrigeração	79
3 PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO EXPERIMENTAL	81
3.1 Tubeiras	81
3.2 Área de contato entre rebolo e tubeira	85
3.3 Bancada de ensaios	85

3.3.1	Máquina ferramenta.....	85
3.3.2	Rebolo.....	87
3.3.3	Sistema de alimentação de fluido lubri-refrigerante.....	90
3.3.4	Sistema de aquisição de imagens dos fluxos (Câmera de vídeo).....	90
3.3.5	Sistema de posicionamento da sapata.....	91
3.4	Análise da exatidão das grandezas de entrada	91
3.4.1	Velocidade angular do rebolo.....	92
3.4.2	Pressão e vazão de alimentação do fluido refrigerante.....	93
3.4.3	Abertura da fenda entre rebolo e tubeira	94
3.5	Determinação da potência.....	95
3.5.1	Influência da velocidade periférica na potência consumida.....	97
3.5.2	Influência da abertura da fenda entre rebolo e tubeira na potência consumida...97	
3.5.3	Influência da vazão do fluido de corte na potência consumida.....	98
3.5.4	Influência da topografia do rebolo na potência consumida.....	99
3.6	Escoamento do fluido dentro da tubeira	100
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	106
4.1	Influência da velocidade periférica na potência consumida.....	106
4.2	Influência da abertura da fenda entre rebolo e tubeira na potência consumida	107
4.3	Influência da vazão do fluido lubri-refrigerante na potência consumida	108
4.4	Influência da topografia do rebolo na potência consumida.....	110
4.5	Análise do escoamento do fluido	111
4.5.1	Escoamento do fluido no interior das tubeiras	117
4.5.2	Influência da velocidade periférica do rebolo sobre o escoamento do fluido no interior da tubeira.	123
4.5.3	Influência da variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira sobre o escoamento do fluido no interior da tubeira.	127
4.5.4	Influência da vazão no escoamento do fluido nos canais das tubeiras.....	136
4.5.5	Influência da topografia do rebolo no escoamento do fluido na tubeira A de canal simples.....	141
4.5.6	Alterações no projeto da tubeira B reta com três canais.....	142
5	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	145
5.1	Conclusões	145
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	148
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149

7	ANEXOS	159
	ANEXO A – Desenho das sapatas	159
	ANEXO B – Máquina retificadora e inversor de frequência	161
	ANEXO C – Sistema de aquisição de imagens	162
	ANEXO D – Comportamento do fluido no interior da tubeira tipo sapata de canal simples para diferentes topografias de rebolo	163
	ANEXO E - Instruções para leitura da tese	166

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Dependência entre grandezas de entrada e resultado de retificação (König, 1980).	26
Figura 2.2 – Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho (Soares & Oliveira, 2002).	27
Figura 2.3 - Remoção de cavaco na retificação (König, 1980).	28
Figura 2.4 - Dependência entre a espessura de usinagem e as variáveis de entrada (König, 1980).	29
Figura 2.5 - Retificação cilíndrica externa de mergulho (Holz & Sauren, 1988).	31
Figura 2.6 - Influência da velocidade de corte sobre as grandezas características do processo e o resultado de trabalho (König, 1980)	33
Figura 2.7 – Vantagem do emprego da retificação a elevadas velocidades de corte (Tönshoff et al, 1998).	35
Figura 2.8 – Tipos de ligantes para altas velocidades de corte (Jackson, 2001).	36
Figura 2.9 – Efeito do diâmetro do rebolo e profundidade da camada na velocidade de ruptura da camada abrasiva (Hitchner, 2001).	37
Figura 2.10 - Rebolo com corpo de titânio e revestimento superabrasivo fixo galvanicamente (König & e Ferlemann, 1991).	38
Figura 2.11 - Características físicas de alguns materiais (Carius, 2000).	40
Figura 2.12 – Microdureza dos materiais abrasivos como função da temperatura (Klyk, 1993).	41
Figura 2.13 - Estruturas de rebolos (König, 1980).	48
Figura 2.14 - Representação esquemática do desgaste radial Δr_s e de quina Δr_{sk} (König, 1980).	49
Figura 2.15 - Tipos de desgaste do grão abrasivo (König, 1980).	49
Figura 2.16 – Cinemática do dressamento com diamante de ponta única (Oliveira, 1992).	53
Figura 2.17 – Ação do grau de recobrimento sobre a topografia do rebolo (Oliveira, 1988). .	53
Figura 2.18 – Quantidade de lubrificantes utilizados em 1997 na Alemanha (Novaski & Dörr apud Catai, 2004)	57
Figura 2.19 – Porcentagem dos custos com fluidos de corte inserida ns custos de fabricação das peças (Novaski & Dörr apud Catai, 2004)	58
Figura 2.20 - Força normal em função de penetração de trabalho utilizando MQFC e emulsão por inundação (Brinksmeier et al, 2000).	62

Figura 2.21 - Tubeira única com (a) incidência normal e (b) incidência tangencial (Imai et al, 1995).	64
Figura 2.22 - Sistema múltiplo de tubeiras (König, 1980).	65
Figura 2.23 - Influência do fluido de corte na força e qualidade da superfície (König, 1980).	68
Figura 2.24 - Influência do fluido de corte no aumento da área plana desgastada do rebolo (Taborga, 2002).	69
Figura 2.25 – Ilustração de um sistema de defletores (Bianchi et al., 2002).	70
Figura 2.26 - Estratégias para o suprimento do fluido de corte (Brinksmeier et al, 1999).	71
Figura 2.27 – Influência da porosidade do rebolo na vazão na zona de corte (Engineer et al, 1992).	71
Figura 2.28 - Influência da posição do bocal na vazão útil (Engineer et al, 1992).	72
Figura 2.29 – Bico tradicional (Webster, 1995)	73
Figura 2.30 – Bico arredondado (Webster, 1995).	74
Figura 2.31 - Geometria dos bicos ejetores do tipo sapata (Brinksmeier et al, 2001).	74
Figura 2.32 – Linhas de escoamento em uma sapata sem condutores para uma vazão de 20 l/min e velocidade de corte de 30 m/s (Brinksmeier et al, 2001).	75
Figura 2.33 - Tensões residuais geradas na peça em função da penetração de trabalho para diferentes bicos ejetores (Brinksmeier et al, 2001).	75
Figura 2.34 - Resultado comparativo para diferentes concepções de sistema de alimentação usando rebolo com ligante resinóide (Weingärtner, 2005).	77
Figura 2.35 – Alimentação de fluido de corte com jato livre com pressão 0,1 bar (Weingärtner, 2005).	77
Figura 2.36 – Alimentação de fluido com tubeira do tipo sapata (pressão de 1,1 bar) (Weingärtner, 2005).	78
Figura 2.37 – Relação de remoção G como função do sistema de lubri-refrigeração na retificação com rebolo de CBN com ligante vitrificado (Weingärtner, 2005).	78
Figura 2.38 – Fatores relacionados à geometria da sapata (Beck, 2002).	79
Figura 3.1 – Tubeira tipo sapata com diferentes formatos de canais	82
Figura 3.2 – Protótipo em resina poliuretânica mostrando a montagem do conjunto tubeira, rebolo e peça.	84
Figura 3.3 – Tubeira A tipo sapata de canal simples bipartida fabricada em acrílico.	84
Figura 3.4 – Encapsulamento do rebolo e tubeira.	86
Figura 3.5 – Operação de recartilamento do rebolo e rebolo recartilhado.	87
Figura 3.6 – Disco de alumínio revestido com lixa abrasiva.	88

Figura 3.7 – Ranhuras com formato de cauda de andorinha para ancoragem do revestimento abrasivo.....	88
Figura 3.8 – Rebolo com núcleo de alumínio.....	89
Figura 3.9 – Comparação entre as superfícies obtidas e a superfície do rebolo de óxido de alumínio.	89
Figura 3.10 – Esquema do sistema de fornecimento do fluido lubri-refrigerante.....	90
Figura 3.11 – Esquema indicando o deslocamento em z do rebolo.	91
Figura 3.12 – Medição da rotação do rebolo com tacômetro digital.....	92
Figura 3.13 – Manômetro para medição da pressão interna da tubeira.....	93
Figura 3.14 – Fluxograma da sequência dos ensaios para avaliar a potência consumida.	96
Figura 3.15 – Filmagem das tubeiras e seus canais.....	101
Figura 3.16 – Regiões da tubeira que foram avaliadas nas filmagens.....	104
Figura 3.17 – Sistemática utilizada nos ensaios para avaliar o escoamento na tubeira A de canal simples.....	105
Figura 4.1 – Consumo de potência em função da velocidade periférica do rebolo.....	106
Figura 4.2 - Consumo de potência em função da fenda entre rebolo e tubeira para velocidade de 60 m/s.	107
Figura 4.3 - Consumo de potência em função da fenda entre rebolo e tubeira para velocidade de 100 m/s.	108
Figura 4.4 - Consumo de potência em função da vazão do fluido para $v_s = 60$ m/s.	109
Figura 4.5 - Consumo de potência em função da vazão do fluido para $v_s = 100$ m/s.	109
Figura 4.6 – Consumo de potência em função da abertura da fenda entre rebolo e tubeira para as tubeiras analisadas, usando um rebolo e um disco de alumínio recartilhado....	110
Figura 4.7 – Simulação numérica do escoamento do fluido na tubeira A de canal simples, velocidade 100 m/s, fenda 0,5 mm, vazão 10 l/min.	112
Figura 4.8 – Simulação numérica do escoamento do fluido na tubeira B reta com três canais, fenda 0,5 mm, vazão 10 l/min.	113
Figura 4.9 – Simulação numérica do escoamento do fluido na tubeira C côncava com três canais, velocidade 100 m/s, fenda 1,0 mm, vazão 10 l/min.	114
Figura 4.10 – Simulação numérica do escoamento do fluido na tubeira D convexa com três canais, velocidade 100 m/s, vazão 10 l/min e fenda variável.....	114
Figura 4.11 – Influência da abertura da fenda entre tubeira e rebolo e a velocidade periférica do rebolo sobre o comportamento do escoamento do fluido na saída da tubeira A tipo sapata.....	115

Figura 4.12 – Influência da abertura da fenda entre tubeira e rebolo e a velocidade periférica do rebolo sobre o comportamento do escoamento do fluido na saída da tubeira B tipo sapata reta com três canais.....	116
Figura 4.13 – Influência da abertura da fenda entre tubeira e rebolo e a velocidade periférica do rebolo sobre o comportamento do escoamento do fluido na saída da tubeira C tipo sapata côncava com três canais.....	116
Figura 4.14 – Influência da abertura da fenda entre tubeira e rebolo e a velocidade periférica do rebolo sobre o comportamento do escoamento do fluido na saída da tubeira D tipo sapata convexa com três canais	117
Figura 4.15 – Escoamento do fluido na região de entrada da tubeira B reta com três canais para fenda variável (filme 1 do CD anexo)	119
Figura 4.16 – Escoamento do fluido no interior da tubeira A reta de canal simples para velocidade periférica de 100 m/s e fenda de 0,10 mm (filme 2 do CD anexo).	120
Figura 4.17 – Influência das nervuras direcionais sobre o fluxo do fluido no interior da tubeira C, côncava com três canais (filme 3 do CD anexo).	120
Figura 4.18 – Escoamento do fluido na região de entrada da tubeira C côncava com três canais com fenda variável (filme 4 do CD anexo)	121
Figura 4.19 – Escoamento do fluido na região de entrada da tubeira D convexa com três canais para fenda variável (filme 5 do CD anexo).	122
Figura 4.20 – Escoamento do fluido para tubeira A de canal simples próximo a superfície do rebolo para velocidade variável (filme 12 do CD anexo).....	123
Figura 4.21 – Escoamento do fluido no interior do canal c1 da tubeira C côncava com três canais para velocidade variável (filme 13 do CD anexo).....	124
Figura 4.22 – Escoamento do fluido no interior do canal c2 da tubeira C côncava com três canais para velocidade variável (filme 14 do CD anexo).....	125
Figura 4.23 – Escoamento do fluido no interior do canal c3 da tubeira C côncava com três canais para velocidade variável (filme 15 do CD anexo).....	126
Figura 4.24 – Escoamento do fluido para tubeira A reta de canal simples próximo a superfície do rebolo com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 22 do CD anexo).....	128
Figura 4.25 – Escoamento do fluido no interior do canal c1 da tubeira B reta com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 23 do CD anexo).....	129
Figura 4.26 – Escoamento do fluido no interior do canal c2 da tubeira B reta com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 24 do CD anexo).....	130

Figura 4.27 – Escoamento do fluido no interior do canal c3 da tubeira B reta com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 25 do CD anexo).....	131
Figura 4.28 – Escoamento do fluido no interior do canal c1 da tubeira C côncava com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 26 do CD anexo).....	131
Figura 4.29 – Escoamento do fluido no interior do canal c2 da tubeira C côncava com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 27 do CD anexo).....	132
Figura 4.30 – Escoamento do fluido no interior do canal c3 da tubeira C côncava com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 28 do CD anexo).....	133
Figura 4.31 – Escoamento do fluido no interior do canal c1 da tubeira D convexa com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 29 do CD anexo).....	134
Figura 4.32 – Escoamento do fluido no interior do canal c2 da tubeira D convexa com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 30 do CD anexo).....	134
Figura 4.33 – Escoamento do fluido no interior do canal c3 da tubeira D convexa com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 31 do CD anexo).....	135
Figura 4.34 – Escoamento do fluido no interior da tubeira A de canal simples, velocidade de 100 m/s e vazão de 5 l/min (vazão de 5 à 15 l/min, filme 32 do CD anexo).....	137
Figura 4.35 – Escoamento do fluido no interior do canal c1 da tubeira C côncava com três canais variando a vazão do fluido (filme 33 do CD anexo).....	138
Figura 4.36 – Escoamento do fluido no interior do canal c2 da tubeira C côncava com três canais variando a vazão do fluido (filme 34 do CD anexo).....	139
Figura 4.37 – Escoamento do fluido no interior do canal c3 da tubeira C côncava com três canais variando a vazão do fluido (filme 35 do CD anexo).....	139
Figura 4.38 – Escoamento do fluido no interior do corpo da tubeira A de canal simples com fenda variável, rebolo dressado com $U_d = 3,5$ (filme 42 do CD anexo).....	141
Figura 4.39 – Escoamento do fluido no interior do corpo da tubeira B reta com três canais usando partículas rastreadoras (filme 43 CD em anexo).....	143
Figura 4.40 – Escoamento do fluido no interior dos canais da tubeira B reta usando partículas rastreadoras (filme 44 CD em anexo).....	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Grãos de CBN, ligantes, revestimento e aplicações (GE superabrasivos, 1998).	43
Tabela 2.2 - Propriedades básicas dos sistemas de ligantes (Firma diametal, 2004).	45
Tabela 2.3 – Características dos fluidos de corte (1 = pior; 4 = melhor) (Sreejith & Ngoi, 2000).	58
Tabela 2.4 – Faixa de relação de remoção para diversos fluidos de corte (Tabesh, 1990).	66
Tabela 3.1 – Rotação, velocidade periférica do rebolo e frequência usados nos ensaios.	86
Tabela 3.2 – Valores de rotação do rebolo e velocidade de avanço do dressador para diferentes graus de recobrimento.	89
Tabela 3.3 – Verificação da velocidade angular do rebolo.	93
Tabela 3.4 – Pressão interna a tubeira e vazão para diferentes fendas de trabalho.	94
Tabela 3.5 – Valores de vazão medidos no hidrômetro.	94
Tabela 3.6 – Parâmetros empregados nos ensaios de potência consumida para os diferentes tipos de tubeiras com variação da velocidade.	97
Tabela 3.7 – Parâmetros empregados nos ensaios de potência consumida para os diferentes tipos de tubeiras com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira.	98
Tabela 3.8 – Parâmetros empregados nos ensaios de potência consumida para os diferentes tipos de tubeiras com variação da vazão.	99
Tabela 3.9 – Parâmetros empregados nos ensaios de potência consumida para diferentes tipos de tubeiras com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira com rebolo recartilhado.	100
Tabela 3.10 – Parâmetros empregados nos ensaios de escoamento para tubeira A de canal simples.	102
Tabela 3.11 – Parâmetros empregados nos ensaios de escoamento para tubeira B reta com três canais com variação da velocidade periférica.	102
Tabela 3.12 – Parâmetros empregados nos ensaios de escoamento para tubeira B reta com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira.	103
Tabela 3.13 – Parâmetros empregados nos ensaios de escoamento para tubeira B reta com três canais com variação da vazão.	103
Tabela 3.14 – Parâmetros empregados nos ensaios de escoamento para tubeira A de canal simples com variação da topografia do rebolo.	104

Tabela 4.1 – Comportamento do fluido no interior das tubeiras tipo sapata com variação da velocidade periférica do rebolo para fenda de 0,25 mm e vazão de 10 l/min.	127
Tabela 4.2 – Comportamento do fluido no interior das tubeiras tipo sapata com velocidade periférica do rebolo 100 m/s, vazão 10 l/min e variação da fenda entre rebolo e tubeira (mm)	136
Tabela 4.3 – Comportamento do fluido no interior das tubeiras tipo sapata com variação da vazão, fenda 0,25 mm e velocidade do rebolo de 100 m/s	140
Tabela 4.4 – Comportamento do fluido interior da tubeira A de canal simples para abertura da fenda entre rebolo e tubeira de 0,25 mm, vazão 10 l/min, velocidade periférica do rebolo 100 m/s e diferentes topografias de rebolo.	142

SIMBOLOGIA

Letras Maiúsculas

A	Área plana desgastada	[%]
A _{sc}	Superfície de desgaste total	[mm ²]
A _{sd}	Área de dressamento	[mm ²]
A _{sk}	Superfície de desgaste de quina	[mm ²]
A _{sr}	Superfície de desgaste radial	[mm ²]
C _{stat}	Distribuição estatística dos gumes	[mm ⁻³]
D _m	Diâmetro da mangueira de alimentação de fluido de corte	[mm]
F _n	Força normal	[N]
F' _n	Força normal específica	[N/mm]
F _{ns}	Força normal no gume	[N]
F _t	Força de corte tangencial	[N]
F _{ts}	Força tangencial no gume	[N]
G	Relação de remoção	[mm ³ /mm ³]
K ₁₀₀	Dureza Knoop	[N/mm ²]
N	Rotação	[rpm]
P	Pressão	[N/m ²]
P _c	Potência consumida	[kW]
P _o	Pressão absoluta (pressão de referência)	[N/m ²]
P _a	Pressão de alimentação do fluido de corte	[bar]
Os	Potência de corte	[kW]
P _{sat}	Pressão de saturação	[N/m ²]
Q	Vazão	[l/min]
Q'	Volume usinado específico	[mm ³ /mm.s]
Q _s	Vazão do fluido de corte	[l/min]
R _a	Desvio médio aritmético da rugosidade	[μm]
R _{ts} (R _t)	Rugosidade	[μm]
S _d	Passo de dressamento	[mm]
T	Tempo	[s]
U _d	Grau de recobrimento	-

V_a	Tensão de alimentação	[volts]
V_t	Volume total do rebolo	[mm ³]
V_{fad}	Velocidade de avanço do dressador	[mm/s]
V_s	Volume desgastado do rebolo	[mm ³]
V_w	Volume de material removido da peça	[mm ³]
V'_w	Volume específico total	[mm ³ /mm]
$Z_w (Q_w)$	Taxa de retificação	[mm ³ /s]
$Z'_w (Q'_{sw}, Z')$	Taxa de retificação específica	[mm ³ /mm.s]
Z_v	Influência da camada limite	-
W_t	Ondulação teórica	[μm]

Letras Minúsculas

a	Penetração de trabalho	[mm]
a_d	Profundidade de dressamento	[μm]
a_e	Profundidade de corte (no sentido de avanço)	[mm]
a_p	Largura de corte (no sentido do eixo do rebolo)	[mm]
b_d	Largura de atuação do dressador	[mm]
b_{dr}	Largura de atuação real do dressador	[mm]
$b_s (b)$	Largura do rebolo	[mm]
D	Diâmetro do bocal de aplicação do fluido de corte	[mm]
d_s	Diâmetro do rebolo	[mm]
d_{se}	Diâmetro equivalente do rebolo	[mm]
d_w	Diâmetro da peça	[mm]
F	Fenda teórica (abertura da fenda entre rebolo e tubeira)	[mm]
f_k	Erro de forma	[μm]
f_{ps}	Velocidade de filmagem	-
h_{cu}	Espessura de cavaco não deformado	[mm]
$h_{cu\ eff}$	Espessura de usinagem efetiva	[mm]
k	Fator de proporcionalidade	
l_k	Comprimento de contato	[mm]
q	Relação de velocidades na retificação	-
r_s	Raio do rebolo	[mm]
r_p	Raio da ponta do dressador	[mm]

t_s	Tempo de corte	[min]
v_c	Velocidade de corte	[m/s]
v_d	Velocidade de avanço no dressamento	[m/s]
v_{sj}	Velocidade de saída do jato de fluido de corte	[m/s]
v_f	Velocidade de mergulho	[m/s]
v_j	Velocidade de saída do jato de fluido de corte	[m/s]
v_s	Velocidade periférica do rebolo	[m/s]
v_w	Velocidade da peça	[m/min]

Letras Gregas

$\cos \varphi$	Fator de potência	-
α, β, γ	Expoentes da expressão para a espessura de usinagem, h_{cu}	-
π	Constante	-
η	Ângulo de ação	[°]
Δ_I	Corrente consumida	[Amper]
Δr_s	Desgaste radial do rebolo	[mm ²]
Δr_{sc}	Desgaste total do rebolo	[mm ²]
$\Delta r_{sk} (\Delta_{sk})$	Desgaste de quina do rebolo	[mm ²]
ρ	Massa específica	[Kg/m ³]
ρ_s	Densidade do fluido	[Kg/m ³]
τ_μ	Espessura mínima para formação de cavaco	[mm]
σ	Fator de Thoma (fator de cavitação)	-
υ	Temperatura	[°K]

Abreviaturas e Símbolos Químicos

Ag	Prata
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
BN	Nitreto de boro
CAD	Desenho assistido por computador
CBN	Nitreto de boro cúbico
CCD	Charge coupled device

CEFET/SC	Centro Federal de Educação Tecnológica de SC
CD	Compact Disc
CFX	Código Computacional Comercial
CNC	Comando numérico computadorizado
Cu	Cobre
CVD	<i>Chemical vapor deposition</i>
D	Diamante
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
E	Ligante Eletroquímico
H ₂ O	Água
H ₃ BO ₃	Ácido bórico
IWT	Instituto de Técnica de Materiais
K ₁₀₀	Dureza Knoop
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
M	Ligante metálico
MCD	Diamante monocristalino
MQFC	Quantidade mínima de fluido de corte
MQL	Mínima quantidade de líquido
NH ₃	Amônia
PCD	Diamante policristalino
R	Ligante de resina
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos
SiC	Carboneto de silício
SC	Santa Catarina
Ti	Titânio
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
V	Ligante vitrificado

RESUMO

A retificação é um processo dos mais importantes dentro do universo da usinagem. Tentando acompanhar o elevado desenvolvimento tecnológico, o processo de retificação vem utilizando altas taxas de retificação. O aumento da taxa de retificação é possível com o emprego de alta velocidade de corte associado à utilização de rebolos superabrasivos. No processo de retificação o aumento da velocidade de corte leva ao aumento da quantidade de calor gerado no processo. Diante deste quadro, o fluido refrigerante apresenta-se como um recurso indispensável para evitar a ocorrência de danos térmicos nas peças e desgaste prematuro do rebolo. Uma alternativa interessante para melhorar a aplicação do fluido refrigerante na retificação é a utilização de tubeiras tipo sapata. Com este tipo de tubeira é possível aumentar o efeito de arraste do fluido pelo rebolo, ao mesmo tempo em que é minimizado o efeito da camada de ar criada com a rotação do rebolo. Um projeto eficiente de sapata ainda possibilita aumentar a velocidade de saída do fluido junto ao rebolo, sem aumentar significativamente a potência necessária para que uma maior quantidade de fluido atinja a região de corte. Com o objetivo de melhorar a capacidade de refrigeração obtida com as tubeiras tipo sapata, foram projetadas quatro tipos de tubeiras a serem analisadas. Uma tubeira tipo sapata de canal simples, uma tubeira tipo sapata com canais retos, uma tubeira tipo sapata com canais côncavos e uma tubeira tipo sapata com canais convexos. Para possibilitar a visualização do escoamento do fluido dentro das tubeiras, elas foram construídas em acrílico e água foi utilizada como fluido. Como rebolo foi utilizado um disco de alumínio, revestido com uma camada de abrasivo. Foram realizados ensaios de consumo de energia e escoamento do fluido no interior das tubeiras. A energia consumida foi determinada medindo a corrente consumida no processo, o escoamento do fluido dentro da tubeira foi analisado com base nos filmes realizados com uma filmadora de alta velocidade. Nos ensaios foram empregadas velocidades periféricas do rebolo entre 60 e 120 m/s, duas topografias de rebolo, três vazões de fluido e abertura da fenda entre rebolo e tubeira variável de zero a 2,0 mm. Os resultados mostram que a energia consumida em todos os ensaios se manteve abaixo de 2 kW. O escoamento do fluido dentro da tubeira sofre uma influência significativa com a variação da abertura da fenda entre tubeira e rebolo. A tubeira que apresentou o menor consumo de potência foi a tubeira simples. A tubeira que apresentou a menor perturbação no escoamento do fluido foi a tubeira tipo sapata com canais retos.

ABSTRACT

The grinding is a very important process inside the universe of machining. Trying to follow the high technological development, the grinding process has achieved high grinding rate. The increase of the grinding rate is possible with the job of high speed of cut associated with the use of super abrasive grinding wheels. In the grinding process the increase of the cut speed leads to the increase of the amount of heat generated in the process. Before this occurrence, the cooling fluid is presented as an indispensable resource to prevent the incidence of thermal damages in the parts and consumes prematurely the grinding wheels. An interesting alternative for improving the application of the cooling fluid in the grinding is the use of shoe nozzles. With the shoe it is possible to increase the effect of drag of the fluid for grinding wheels at the same time where the effect of the created air layer is minimized with the rotation of grinding wheels. An efficient project of shoe still makes possible the increase of the speed of the fluid output next to the grinding wheels without increasing significantly the necessary power so that a bigger amount of fluid reaches the cut region. With the objective to improve the capacity of cooling obtained with the shoe nozzles, four nozzles have been projected to be analyzed: a shoe nozzle without canals, a shoe nozzle with straight canals, a shoe nozzle with concave canals and a shoe nozzle with convex canals. Inside, to make possible the visualization of the flow of the fluid of the nozzles, they have been constructed in acrylic and the water was used with fluid. As grinding wheels, a disk of aluminum, coated with a layer of abrasive was used. The tests of energy consumed and condition of flow were carried through. The energy consumed was determined by measuring the current consumed in the process; the condition of the flow inside of the nozzle was analyzed on the basis of the films carried through by means of a camera of high speed. In the tests, grinding wheels peripheral speeds were used between 60 and 120 m/s, as well as two topographies of grinding wheels, three fluid flow rates and opening of the crack between grinding wheels and nozzle variable of zero up to 2,0mm. The results showed the energy consumed in all the tests if kept below 2 kW. The flow of the fluid inside of the nozzle suffered significant influence in respect to the variation from the opening of the crack between the nozzle and the grinding wheels. The nozzle that presented the best result related to the consumed power was the nozzle without conductors. The nozzle that presented the best result related to the flow condition was the shoe nozzle with straight canals.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A retificação é um processo amplamente empregado na indústria metal-mecânica, tanto na obtenção de precisão dimensional, como qualidade superficial. Geralmente é o processo final na fabricação de peças, portanto, se não for devidamente executada, representará perdas de alto custo no processo produtivo. Assim, ocorre uma busca contínua de aperfeiçoamento do processo, a fim de minimizar os custos e aumentar a produtividade (Oliveira, 1988).

Relatórios de pesquisas mostram a retificação como um dos processos mais utilizados, estando presente com 25% na indústria, competindo com o torneamento, fresamento e furação que juntos soma 67 % de utilização. Isto pode ser explicado pelo desenvolvimento de novas retificadoras, nova tecnologia de projeto de rebolos, nova tecnologia de processo e novos abrasivos (Tönshoff et al, 1998).

O processo de retificação ocorre por meio de interações entre os grãos abrasivos do rebolo e a peça a ser retificada, sendo virtualmente, toda esta energia transformada em calor, o qual é concentrado dentro da região de corte. As elevadas temperaturas podem produzir vários tipos de danos térmicos à peça, como: queimam da superfície, mudanças micro-estruturais, aparecimento de tensões residuais, e até a deterioração da qualidade final da peça produzida (Malkin, 1989).

Com o desenvolvimento dos rebolos superabrasivos de diamante e de CBN foi possível à utilização, com sucesso, do processo de retificação com elevadas velocidades de corte (*high speed grinding*) e a retificação profunda (*creep feed grinding*). Nessas operações, os cuidados com o processo devem ser maiores, não somente em função da maior exatidão e acabamentos exigidos, mas também porque um insucesso na operação pode inviabilizar o produto, e com ele todo o investimento realizado em etapas de produção anteriores (Bailey et al, 2002).

O fluido de corte, também chamado de fluido lubri-refrigerante apresenta-se como um recurso indispensável para o controle da temperatura no processo de retificação. Possui um custo, que no setor produtivo chega a 20% do custo total da fabricação (Novaski & Rios, 2002). De acordo com Novaski & Rios (2002), os custos relativos aos fluidos tornaram-se acentuados devido ao elevado consumo e freqüentes descartes que vão ao sentido contrário

das políticas de preservação ambiental, sendo, portanto, necessários que se desenvolvam sistemas compatíveis com o meio ambiente e com a saúde dos trabalhadores.

A eficácia do fluido lubri-refrigerante na retificação de alta velocidade depende, entre outros fatores, do tipo de fluido, da pressão e vazão de alimentação, do projeto da tubeira e da velocidade de escoamento do fluido na saída da tubeira.

Estudos realizados por Brinksmeier (2000), relatam que a utilização de tubeiras tipo sapatas com elementos condutores melhora o escoamento do fluido, permitindo o preenchimento dos espaços dos poros do rebolo, sendo a alimentação do fluido refrigerante realizada sem praticamente nenhuma turbulência.

Pesquisas realizadas por Weingärtner (2005) no LMP-UFSC utilizando sapata sem condutores mostraram um ganho econômico considerável na retificação de virabrequins de ferro fundido nodular em elevada velocidade de corte empregando rebolos de CBN e emulsões de óleo em água.

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento do fluxo de fluido lubri-refrigerante em tubeiras tipo sapata para retificação de alta velocidade, determinar a potência necessária para realizar o fornecimento de fluido a região de corte, simular o escoamento do fluido dentro das tubeiras e caracterizar o comportamento do escoamento do fluido no interior das tubeiras.

As tubeiras analisadas foram desenvolvidas com canais condutores para permitir o fornecimento de fluido lubri-refrigerante a região de contato rebolo/peça eliminando o colchão de ar que é arrastado pelo rebolo,

A avaliação inicial das tubeiras foi realizada através de simulação numérica e essas simulações foram comparadas aos resultados experimentais obtidos a partir da filmagem do escoamento por uma câmera filmadora de alta velocidade.

As tubeiras, aqui analisados, além de serem avaliadas segundo o comportamento do escoamento do fluido também foram analisadas quanto à potência consumida, à abertura da fenda entre o rebolo e tubeira, à vazão suficiente para manter o fluxo do fluido sem perturbações, à pressão de alimentação e às mudanças do comportamento do fluido dentro da tubeira com variação da velocidade periférica do rebolo de 60 a 120 m/s.

O diferencial deste trabalho são as tubeiras tipo sapata com canais de seção constante, que diferente dos dispositivos já desenvolvidos e testados, não possuem mudanças bruscas de seção interna ao longo do percurso do fluido e a área interna dos canais da sapata não variam ao longo de seu comprimento o que garante um escoamento do fluido de forma a diminuir o escoamento turbulento. Dessa forma as perturbações devem acontecer com maior intensidade

na região próxima ao contato com o rebolo, onde o gradiente de velocidade é bastante intenso. A existência de três canais de alimentação traz como vantagem a possibilidade que no 1º e no 2º canais aconteça a eliminação do ar que entra na tubeira arrastado pelo rebolo, permitindo o aumento da abertura da fenda entre rebolo e tubeira, sem prejuízo do escoamento na saída do 3º canal junto à peça. Nesse sistema não existe a necessidade da utilização de altas pressões de alimentação do fluido, porque a forma da tubeira e a sua proximidade com o rebolo permitem a alimentação de fluido com o auxílio do rebolo, funcionando como uma bomba que impulsiona o fluido para a região de trabalho.

A geometria das novas tubeiras não apresenta cantos vivos, possibilita o fechamento lateral do rebolo, e evita a entrada de ar. Possui ainda pequeno comprimento de contato com o rebolo, pequena distância da peça e folga ajustável. Essa nova concepção possibilita uma eliminação quase que total dos problemas característicos do processo.

Para idealizar a concepção das tubeiras tipo sapata, após estudos preliminares, as mesmas foram executadas em poliuretano com o objetivo de verificar a viabilidade de execução das geometrias idealizadas. Em um passo seguinte, para poder executar as filmagens do escoamento do fluido no interior da tubeira, as mesmas foram fabricadas em acrílico.

Para avaliar a eficiência das tubeiras foram concebidas quatro tubeiras tipo sapata com geometrias diferentes. Uma sapata simples, sem elementos condutores, denominada tubeira A de canal simples e desenvolvida com a finalidade de comparar com os sistemas de fornecimento de fluido guiados estudados neste trabalho. Uma sapata com canais retos, denominada tubeira B reta com três canais, de fabricação simples e que atende os requisitos de tangência junto à superfície do rebolo. Uma sapata com canais côncavos, tangencial, denominada tubeira C côncava com três canais, em que se espera uma perturbação menor do fluido, sem ter seu escoamento prejudicado por turbulências ou separações (Wittmann et al, 2000). Por fim, uma sapata com canais convexos, radial, denominada tubeira D convexa com três canais, que possui uma incidência radial do fluido sobre o rebolo.

A combinação da retificação de alta velocidade com utilização de pequenas quantidades de fluido lubri-refrigerante na retificação é uma meta difícil de ser atingida, e também é objetivo deste trabalho.

Autores como Brinksmeier (2000) e Weingärtner (2005) já demonstraram as vantagens do uso de tubeiras tipo sapata. Brinksmeier estudou a influência de condutores internos radiais, retos e tangenciais no comportamento do fluido, concluindo que o uso de condutores melhora o fluxo do fluido. Weingärtner realizou testes com sapata simples e obteve um aumento significativo na taxa de remoção quando comparado a tubeiras de jato

livre. Considerando os resultados já obtidos definiu-se por realizar uma análise detalhada nas tubeiras tipo sapata e alterando sua geometria analisar o comportamento do fluido no seu interior.

Desta forma o estudo do comportamento do fluxo de fluido lubri-refrigerante, o desenvolvimento e otimização de novas tubeiras para administração de fluido de corte no processo de retificação em alta velocidade com rebolos superabrasivos, indicam uma melhora significativa na vida da ferramenta, com conseqüente redução dos custos de fabricação, além de reduzir a potência necessária ao processo, melhora na qualidade das superfícies geradas, redução nos danos da camada termicamente afetada, melhora no controle geométrico e dimensional das peças retificadas e uma significativa redução de consumo de fluido lubri-refrigerante.

1.1 Estruturação e condução do trabalho de pesquisa

O presente trabalho de tese foi estruturado da seguinte forma:

O **Capítulo 2** apresenta uma revisão do processo de retificação com rebolos superabrasivos de alta velocidade, analisa os requisitos necessários à obtenção de um sistema de refrigeração eficiente que aumente a produtividade do processo.

O **Capítulo 3** aborda a metodologia adotada para atingir os objetivos, o planejamento e a execução dos experimentos, destacando os ensaios de medição de potência consumida e do escoamento do fluido dentro da tubeira. Trata também da proposição e desenvolvimento do sistema de ensaio utilizado na qualificação das tubeiras.

No **Capítulo 4** são apresentados os resultados. A potência consumida é mostrada através de gráficos, e o escoamento do fluido dentro da tubeira é apresentado sobre a forma de filmes que acompanham a tese gravada em um CD.

No **Capítulo 5** encontram-se as considerações finais sobre o trabalho e sobre os resultados, analisando o consumo de potência para cada tubeira individualmente quando se variam a abertura da fenda entre rebole e tubeira, a vazão, a velocidade periférica e a topografia do rebole. Bem como, uma análise do comportamento do fluido no interior das tubeiras, indicando os pontos problemáticos e sugerindo alternativas para minimizar esses problemas, bem como sugestões para trabalhos futuros que complementem o trabalho aqui desenvolvido.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Caracterização do processo de retificação

O processo de retificação segundo a norma alemã DIN 8589 é definido como um processo de usinagem com ferramentas de corte de geometria não-definida. Nesses processos, a remoção de material é realizada por grãos mais ou menos disformes de material duro postos em interferência com o material da peça (König, 1980; Winter, 1988). Essa remoção ocorre com geração de grande quantidade de calor que eleva a temperatura da região de trabalho, podendo danificar a peça e/ou acelerar o processo de desgaste do rebolo. Com o objetivo de diminuir o efeito das altas temperaturas são empregados fluidos de corte. A forma, a quantidade e a pressão com que esses fluidos são administrados são de fundamental importância para o sucesso do processo.

A retificação como processo de fabricação deve ser analisado em função das grandezas de entrada, características de processo e resultados de trabalho. A Figura 2.1 apresenta as dependências entre as grandezas de entrada e o resultado de trabalho na retificação.

O processo em si pode ser caracterizado por grandezas como força de corte, potência, desgaste do rebolo, temperatura e duração do processo. As influências externas como vibrações e temperaturas alternantes também atuam sobre o resultado do trabalho (König, 1980).

O resultado de trabalho pode ser avaliado na peça, no rebolo e no fluido refrigerante. Na peça, esse é caracterizado pela exatidão de forma e dimensão, qualidade e integridade da superfície retificada. No rebolo, ele é avaliado principalmente em função do desgaste. Já no fluido refrigerante, o resultado de trabalho é avaliado em função da contaminação e da modificação de suas propriedades (König, 1980).

De acordo com Ferraresi (1970), o processo de retificação, segundo a superfície a ser usinada, pode ser dividido em:

- Retificação cilíndrica externa entre pontas (de mergulho e longitudinal);
- Retificação cilíndrica externa sem centros (de mergulho e longitudinal);
- Retificação cilíndrica interna;

- Retificação plana (tangencial e frontal);
- Retificação de perfis.

Mediante esses tipos de processos de retificação, as formas geométricas que podem ser obtidas com a utilização do rebolo, que é a ferramenta de corte desse processo, são: a cilíndrica externa, cilíndrica interna, plana e plana rotativa (Soares & Oliveira, 2002).

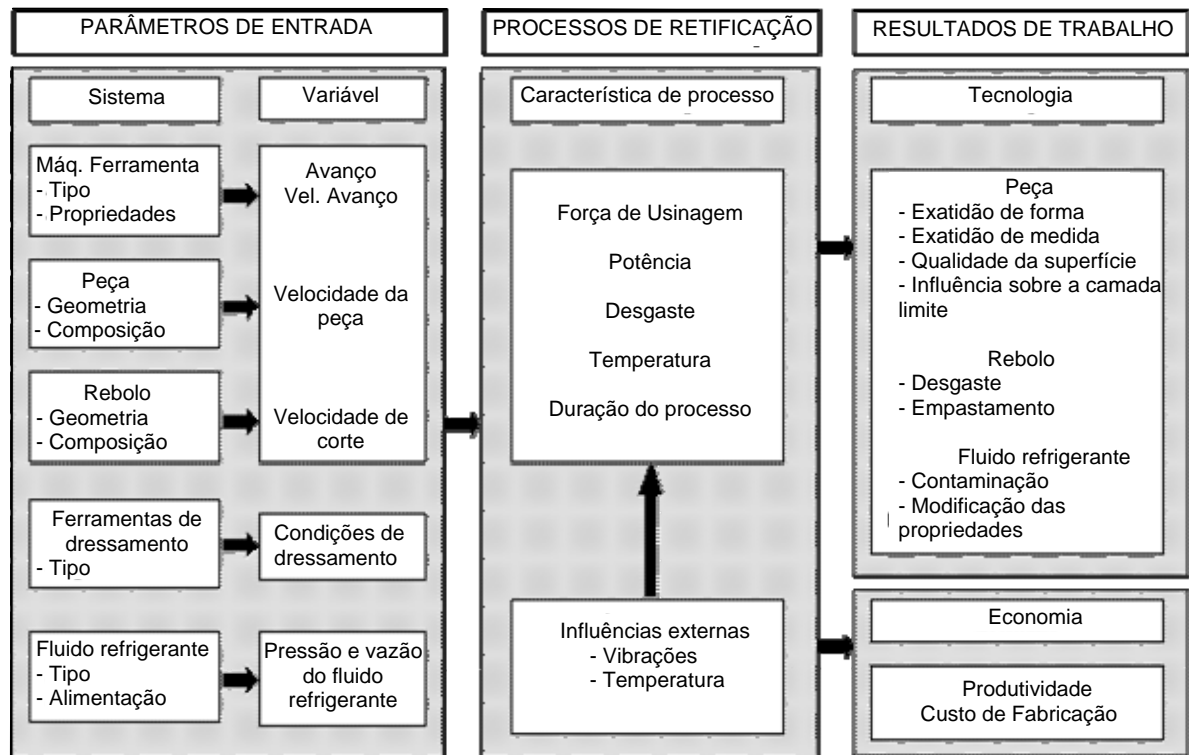


Figura 2.1 - Dependência entre grandezas de entrada e resultado de retificação (König, 1980).

A Figura 2.2 ilustra o comportamento do ciclo de retificação, que é definido como o conjunto de etapas que ocorrem em uma operação, desde a fixação da peça até sua saída.

Na primeira fase (T1) corresponde à aproximação do rebolo até perto da peça, porém sem que haja corte. A segunda fase (T2) expressa o contato peça-rebolo e os momentâneos aumentos da potência consumida pelo motor, assim como da emissão acústica. Nessa fase, tanto a peça quanto o eixo do rebolo deformam-se elasticamente, causando um atraso entre a posição real do rebolo e a posição comandada do rebolo. No tempo (T3) tem-se a profundidade total de corte durante um ciclo de retificação. Já a quarta fase (T4) corresponde à fase de centelhamento, ou ainda *spark-out*, que ocorre quando a peça chega a sua dimensão final (Soares & Oliveira, 2002). Para Monici (2003), o tempo de *spark-out* ou centelhamento, é o tempo necessário para a ocorrência de acomodação das deformações elásticas ocorridas durante o avanço do rebolo sobre a peça. Posteriormente ocorre o afastamento do rebolo e,

finalmente, na fase T6 acontece a troca da peça de trabalho, com possível dressamento (Soares & Oliveira, 2002).

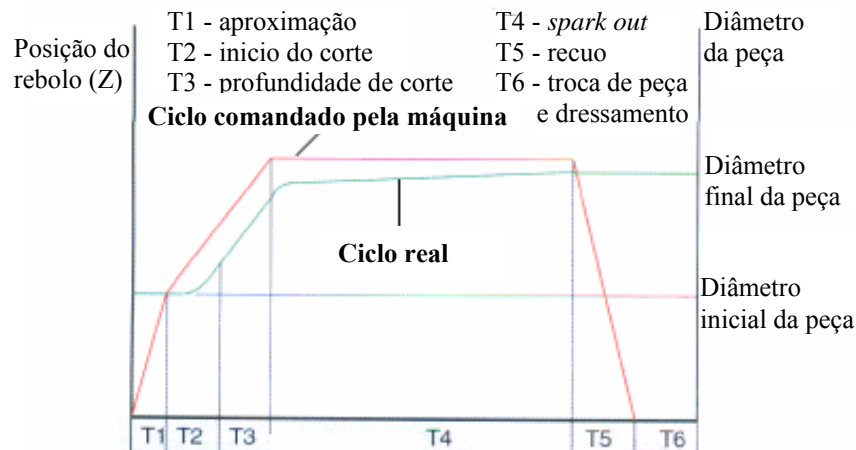


Figura 2.2 – Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho (Soares & Oliveira, 2002).

2.2 Cinemática do processo de retificação

Devido à distribuição aleatória dos grãos, e ao fato de o corte ser realizado por vários gumes, os cavacos resultantes têm diferentes comprimentos e espessuras. Para poder obter uma relação entre a forma do cavaco e as variáveis do processo é necessário a realização de considerações estatísticas para a dedução de leis a partir da cinemática do processo.

König, 1980, caracterizou o mecanismo de formação do cavaco na retificação em três regiões distintas, (Fig. 2.3):

- Região I, em que ocorre apenas deformação elástica e atrito entre o grão abrasivo e a peça;
- Região II, em que ocorrem deformações elástica e plástica (sulcamento) e atrito entre o grão abrasivo e a peça;
- Região III, em que ocorrem deformações elástica e plástica, o atrito entre grão abrasivo e peça e o sulcamento associado à formação de cavacos.

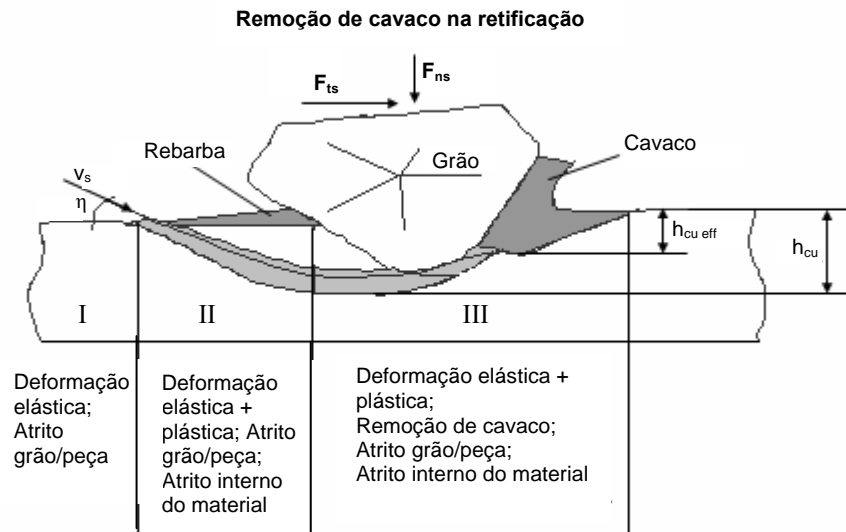


Figura 2.3 - Remoção de cavaco na retificação (König, 1980).

Segundo Vieira (1992), a extensão de cada uma dessas regiões depende principalmente de fatores relacionados às características de agressividade do rebolo (grau de afiação do grão abrasivo), aos parâmetros de operação utilizados (profundidade de corte, velocidade de corte, velocidade da peça), ao coeficiente de atrito entre o grão abrasivo e o material da peça e a relação de diâmetros rebolo/peça.

Tomando como base à Figura 2.4, pode-se observar que existe uma dependência funcional entre a espessura média do cavaco não-deformado (h_{cu}) e as variáveis de entrada: velocidade periférica do rebolo (v_s), velocidade tangencial da peça (v_w) e profundidade de corte (a_e), bem como diâmetro equivalente do rebolo (d_{se}) e a distribuição estatística da densidade de gumes (C_{stat}).

Essa dependência pode ser descrita pela função exponencial, conforme Equação 2.1 (König, 1980):

$$h_{cu} \approx k \cdot \left[\frac{1}{C_{stat}} \right]^\alpha \cdot \left[\frac{v_w}{v_s} \right]^\beta \cdot \left[\frac{a_e}{d_{se}} \right]^\gamma \quad (2.1)$$

Onde k é um fator de proporcionalidade e α , β e γ são constantes determinadas experimentalmente, tendo valores situados entre zero e um.

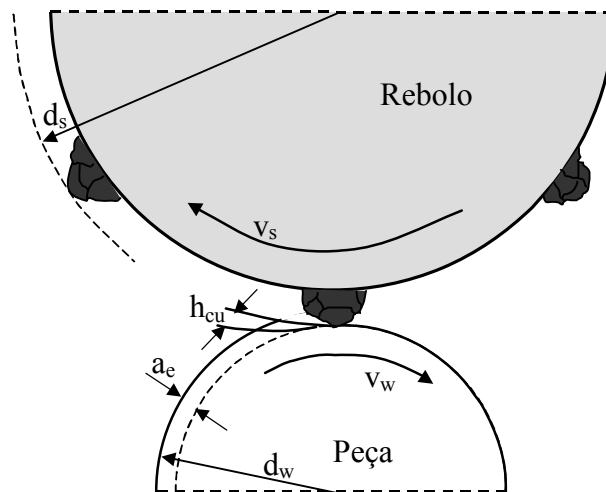


Figura 2.4 - Dependência entre a espessura de usinagem e as variáveis de entrada
(König, 1980).

O diâmetro equivalente (Equação 2.2) é um parâmetro que determina as condições de contato entre o rebolo e a peça, indicando o diâmetro que o rebolo utilizado na retificação cilíndrica deveria ter para proporcionar a mesma geometria de corte, quando utilizado na retificação plana. Dessa forma, esse parâmetro permite a comparação de diferentes processos de retificação, sendo que na retificação plana o diâmetro equivalente é igual ao diâmetro do rebolo. O sinal positivo no denominador é empregado para calcular o diâmetro equivalente no processo de retificação cilíndrica externa, enquanto o sinal negativo é empregado para a retificação cilíndrica interna (König, 1980).

$$d_{se} = \frac{d_w \cdot d_s}{d_w \pm d_s} \quad (2.2)$$

O comprimento de contato (l_k) entre a ferramenta de corte e a peça depende do tipo de processo de retificação, das dimensões da ferramenta, da peça, da profundidade de corte, e pode ser aproximado a partir da Equação 2.3. Com o aumento do comprimento de contato também aumenta o comprimento dos cavacos. Portanto, pressupõe-se que a taxa de retificação (volume de material removido no tempo) e o volume médio de cavaco permaneçam constantes, o aumento do diâmetro equivalente do rebolo, ao provocar o aumento do comprimento dos cavacos, proporciona uma diminuição na espessura média do cavaco não deformado (König, 1980).

$$l_k = \sqrt{a \cdot d_{se}} \quad (2.3)$$

Da Equação 2.1 é possível concluir que, com uma velocidade periférica do rebolo crescente ou uma velocidade da peça decrescente, a espessura média do cavaco não deformado diminui. O motivo para isso é que, sendo mais rápida a atuação de um grão sobre a peça, essa se desloca de um ângulo relativamente menor durante o processo de corte. A velocidade periférica do rebolo não tem influência sobre o volume total de material removido, sendo que um incremento, no seu valor, tem como consequência a formação de um maior número de cavacos para um mesmo volume usinado (König, 1980).

A distribuição estatística da densidade dos gumes (C_{stat}) é definida como o número de gumes por unidade de área do rebolo até uma profundidade de 1 (um) mm. Um mesmo grão pode apresentar vários gumes e, por isso, o afastamento dos gumes estáticos não é igual ao afastamento entre os grãos. Alguns gumes estáticos estão tão recuados na estrutura do rebolo que não chegam a entrar em contato com a peça. Os gumes que participam do processo são chamados de gumes cinemáticos (König, 1980).

2.3 Processo de retificação externa de mergulho

De acordo com a norma DIN 8589 a retificação externa de mergulho, Figura 2.5, está classificada dentro da “retificação cilíndrica externa”, no grupo denominado “retificação com ferramenta rotativa”. Esse processo destaca-se pela quantidade de aplicações na indústria.

Os movimentos de corte são caracterizados pela velocidade periférica do rebolo (v_s), que, freqüentemente, é denominada velocidade de corte, pela velocidade tangencial da peça (v_w) e pela velocidade de avanço (v_f). A profundidade de corte é indicada por (a_e) e a largura de corte por (a_p). No caso da retificação cilíndrica externa de mergulho, a largura de corte é igual à largura do rebolo (b_s) (König, 1980; SME, 1988; Holz & Sauren, 1988).

Um dos principais parâmetros do processo de retificação é a taxa de retificação, que é definida pelo volume de material removido da peça na unidade de tempo. A equação empregada para o cálculo dessa taxa depende do tipo de processo de retificação, sendo que para retificação cilíndrica externa de mergulho pode-se calcular a taxa por meio da Equação 2.4 a seguir (König, 1980):

$$Z_w = \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot b_s \quad (2.4)$$

Para uma real avaliação do potencial de trabalho do processo, a grandeza taxa de retificação (Z_w) deve ser tornada independente da largura efetiva (b_s), que é a largura do rebolo que efetivamente remove material da peça. Assim, após a divisão de Z_w por b_s , é obtida a grandeza - taxa de retificação específica (Z'_w), que tem como unidade milímetros cúbicos de material da peça por milímetros de largura de rebolo por segundo, isto é, $\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$. Logo é possível comparar resultados obtidos para diferentes rebolos, independentemente da sua largura.

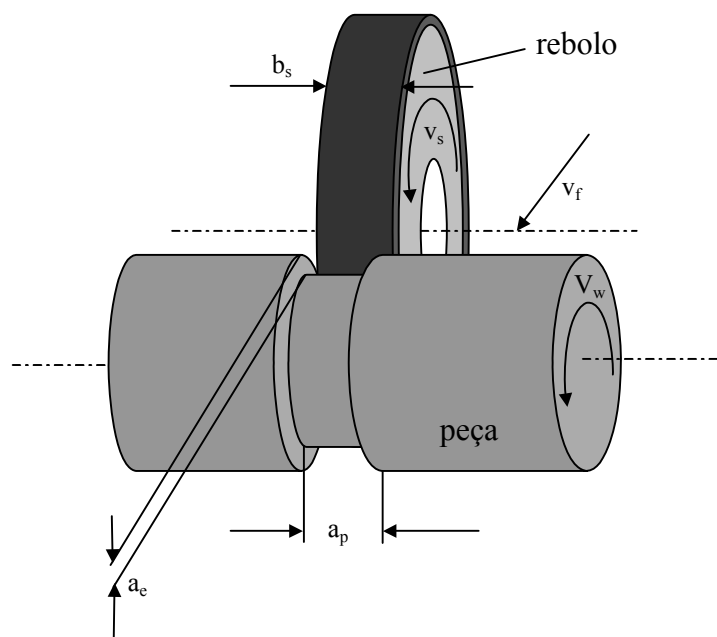


Figura 2.5 - Retificação cilíndrica externa de mergulho (Holz & Sauren, 1988).

Outro parâmetro da retificação cilíndrica externa de mergulho utilizado para efeitos de comparação entre processos é a relação de velocidades, definida pela razão entre as velocidades periféricas do rebolo e da peça (Equação 2.5).

$$q = \frac{v_s}{v_w} \quad (2.5)$$

A relação de velocidades não influencia significativamente o resultado do trabalho de retificação em termos de esforços, rugosidade da superfície retificada e desgaste da ferramenta de corte. Isso porque o aumento da espessura do cavaco não deformado, com o

aumento da velocidade da peça, é compensado pela redução da penetração de trabalho por rotação da peça, como mostra a equação 2.1. Por outro lado, velocidades crescentes da peça diminuem a influência localizada das fontes geradoras de calor, pois com a diminuição da profundidade de corte (a_e) diminui o comprimento de contato (l_k), de forma que uma menor quantidade de calor é transferida para a camada limite. Assim, um ponto aquecido da peça, por retornar em um tempo menor à região de corte, será removido mais rapidamente, promovendo uma eliminação parcial do calor antes que ele tenha condições de penetrar mais profundamente na peça. Portanto, a parte do calor que é eliminada com o cavaco aumenta, e tem-se uma diminuição da temperatura da peça (König, 1980).

2.4 Influência da velocidade de corte sobre o resultado de trabalho

A velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo v_s é representada pelo deslocamento de um ponto em certo espaço de tempo. Essa velocidade é extremamente importante no processo de retificação, pois determina a vida do rebolo, implicando na alteração da capacidade de remoção dos grãos abrasivos e no acabamento da superfície das peças (Winter, 2004).

Segundo Diniz et al. (2000), a velocidade periférica do rebolo é restrita pela resistência da liga aglomerante. Para as ligas vitrificadas, estabelece-se normalmente 30 m/s e para algumas ligas vitrificadas especiais cerca de 60 m/s. No caso de ligas resinóides reforçadas com fibras, a velocidade de corte fica em torno de 100 m/s.

Para Graf (2004), aumentando-se a velocidade de corte, um único grão abrasivo passa a remover um menor volume de cavacos, devido à elevação da frequência de contato com a peça. Dessa forma, tem-se uma espessura menor dos cavacos removidos, reduzindo, por exemplo, as forças de corte, pela menor solicitação de cada grão abrasivo. Contudo, o aumento da intensidade de contato dos grãos com a peça, deve, de certo modo, ser monitorado, pois pode gerar uma elevação da temperatura, o que pode ocasionar a queima da peça.

A Figura 2.6, fornece uma visão geral do comportamento das grandezas características do processo e do resultado de trabalho em dependência da velocidade de corte.

Com o aumento da velocidade de corte, para uma mesma taxa de retificação, ocorre uma diminuição da força normal específica. Esse comportamento pode ser relacionado ao menor número de gumes cinemáticos que atuam no processo e, principalmente, à diminuição

da espessura média do cavaco não deformado (König, 1980, SME, 1988). Se por um lado o aumento da velocidade de corte permite também um decréscimo da força tangencial, isso não é suficiente para compensar a sua própria contribuição ao aumento da potência de corte, de modo que a potência de corte, ($P_s = F_t \cdot v_s$) aumenta com o aumento da velocidade de corte (SME, 1988).

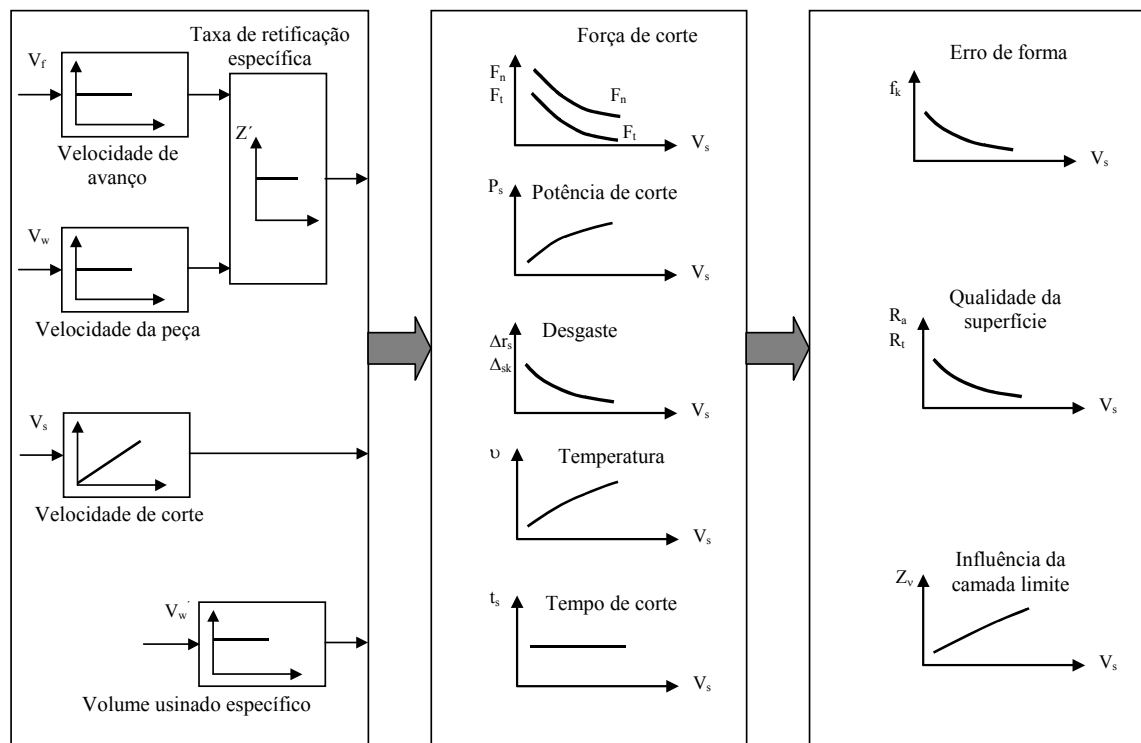


Figura 2.6 - Influência da velocidade de corte sobre as grandezas características do processo e o resultado de trabalho (König, 1980).

Velocidades de corte mais elevadas, em virtude da redução da espessura do cavaco não-deformado, proporcionam um desgaste radial e de quina reduzidos, porque o maior atrito e a frequência crescente de utilização dos gumes são compensados pela menor força de corte e pelo menor tempo de atuação dos gumes por corte (König, 1980).

Um importante parâmetro de avaliação do processo de retificação é a relação de remoção G , obtida através da divisão do volume usinado da peça pelo volume desgastado do rebolo (Equação 2.6).

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (2.6)$$

O aumento da velocidade de corte leva a um aumento da relação de remoção G . Como consequência do aumento da velocidade de retificação tem-se temperaturas maiores na região de contato entre o rebolo e a peça. Em função dessas temperaturas mais altas, verifica-se um aumento da profundidade termicamente afetada na peça. Todavia, podem ser esperados comportamentos distintos para diferentes combinações de materiais de peça e dos grãos abrasivos, em virtude das diferentes condutividades térmicas.

A diminuição de erros de forma e dimensão com o aumento da velocidade de corte decorre da diminuição dos esforços e da diminuição do desgaste do rebolo. Da mesma forma pode-se esperar uma melhora na rugosidade da superfície retificada, visto que as seções de usinagem, para uma mesma taxa de retificação, diminuem com o aumento da velocidade de corte (König, 1980).

A continuidade do desenvolvimento do processo de retificação com rebolos de CBN, impulsionado pelo emprego de velocidades de corte cada vez maiores, fez surgir um claro direcionamento: a retificação de alto desempenho, com o aumento da capacidade de corte, isto é, da aplicação de taxas de retificação cada vez maiores (Beck, 2002). Essa tendência pode ser verificada na Figura 2.7. Com o aumento da velocidade de corte é possível aumentar a taxa de retificação e manter constantes a força de corte, a rugosidade da superfície retificada e o desgaste do rebolo. Isto é possível através da manutenção de uma mesma espessura média do cavaco não-deformado, em que um aumento da velocidade de corte é compensado por um aumento da profundidade de corte (Tönshoff et al, 1998). O aumento da velocidade de corte acima de 100 m/s provoca a redução da temperatura da superfície da peça contribuindo para um desgaste menor do rebolo (Tawakoli, 1990). As principais vantagens do emprego dessa técnica são: o aumento da produtividade e a redução dos tempos de fabricação, os quais são extremamente importantes no universo atual da produção em larga escala.

Atualmente, dentro do contexto de retificação de alto desempenho, são empregadas taxas de retificação específicas na faixa de 50 a 300 mm³/(mm.s), sendo possível substituir, em alguns casos, processos e usinagem com ferramentas de corte de geometria definida, como por exemplo, o torneamento (Muckli, 2000).

Embora as vantagens obtidas com o aumento da velocidade de corte na retificação sejam interessantes, as limitações quanto ao aumento da potência requerida, a necessidade de componentes mecânicos que possibilitem rotações maiores que 20.000 rpm, máquinas com elevada rigidez e sistemas de balanceamento adequados, fazem com que a realização econômica desse processo seja possível somente até uma faixa de velocidade de 250... 300 m/s (Klocke, 1997).

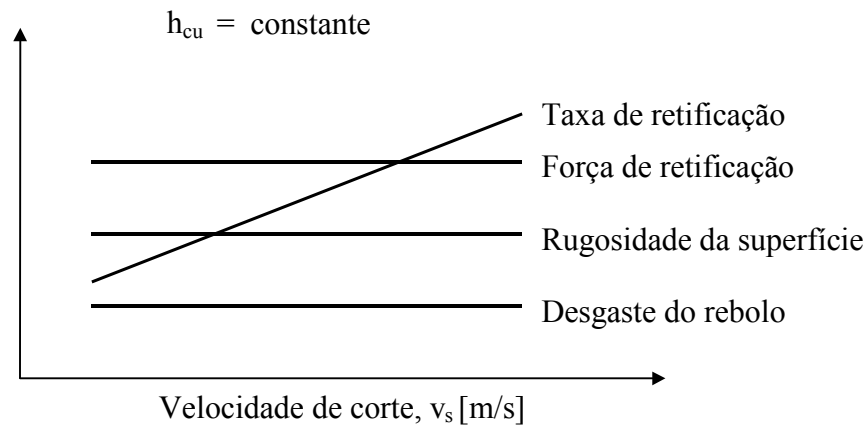


Figura 2.7 – Vantagem do emprego da retificação a elevadas velocidades de corte (Tönshoff et al, 1998).

2.4.1 A evolução do processo de retificação com o aumento da velocidade de corte

Nos últimos 20 anos, o termo alta velocidade passou por muitas variações entre os fabricantes de máquinas ferramentas. Na década de 80, máquinas retificadoras trabalhando a velocidade de 80 m/s com rebolos CBN com ligas vitrificadas eram considerados excepcionais. Pesquisas revelam que é possível chegar à velocidade altíssima de 500 m/s com corpos com características geométricas especiais, mas, para muitos autores, a retificação a altas velocidades está na faixa entre 100 e 200 m/s (Hitchiner, 1999). Nos últimos anos, com o surgimento dos rebolos de CBN de alto desempenho, aliado ao desenvolvimento de novos equipamentos, máquinas e comandos, criaram-se condições para otimização dos processos de retificação em altas velocidades (Tönshoff, 1998).

O aumento da velocidade do rebolo depende entre outros fatores do ligante e do abrasivo utilizado. Os rebolos maciços de grãos abrasivos convencionais (Al_2O_3 e SiC) são projetados para velocidade de no máximo 45 m/s, segundo a norma DIN 69100 (König, 1980). Acima de 60 m/s os rebolos convencionais apresentam um desgaste muito acentuado, ficam cegos rapidamente e por medida de segurança não devem ser utilizados. Os rebolos superabrasivos (Diamante e CBN), fabricados com uma camada abrasiva fixada sobre um corpo-base (alumínio, aço e resina plástica) por ligante, são os mais apropriados para altas e altíssimas velocidades (Diniz et al, 2000).

Os ligantes que suportam altas velocidades são os resinóides, os vitrificados e as ligas metálicas sinterizadas e galvânicas. Altíssimas velocidades são alcançadas acima de tudo com sistemas de ligas metálicas (Fig. 2.8).

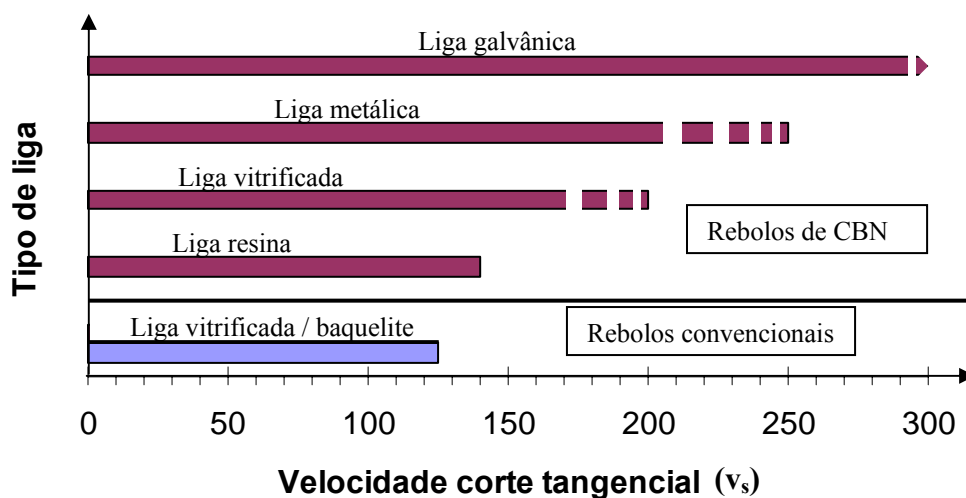


Figura 2.8 – Tipos de ligantes para altas velocidades de corte (Jackson, 2001).

Um método que usa tais sistemas de ligas é a eletrodeposição galvânica. Nesta, os rebolos são produzidos com uma única camada de abrasivo de CBN. A liga de níquel eletrodepositada apresenta excelentes propriedades de retenção dos grãos (Jackson, 2001).

Os rebolos vitrificados são construídos com um anel de segmentos finos vitrificados colados em um corpo-base maciço que permite a retificação em altíssima velocidade. A figura 2.9, mostra que em altíssima velocidade (acima de 250 m/s) não é possível utilizar uma camada de abrasivo maior que cinco milímetros (Hitchner, 2001).

O projeto do rebolo é uma restrição importante na retificação de altíssima velocidade. O desenho convencional de rebolo, envolvendo um corpo retangular e um furo, freqüentemente leva a dilatação excessiva e irregular do corpo e a fratura da camada abrasiva. O desenvolvimento de projetos de rebolos para retificação de altíssima velocidade tem sido focado em redesenhar e aperfeiçoar o formato do corpo para rebolos CBN vitrificados e galvânicos (König & Ferlemann, 1991).

Na retificação a velocidade do fluido refrigerante deve ser condizente com a velocidade periférica do rebolo para que o refrigerante penetre eficientemente na zona de retificação. Na retificação de altíssima velocidade (maior que 200 m/s) a refrigeração usando bocais convencionais requer uma pressão superior a 220 bar. Com estas velocidades é difícil manter um jato laminar de refrigerante para evitar dispersão e pulverização. As taxas de fluxo do refrigerante são altas a essas pressões. A 220 bar, por um rasgo de dois milímetros

passarão 50 l/min/mm, para um rebolo de 25 mm de largura, equivale 1264 l/min. Tais taxas de fluxo e/ou pressões, especialmente nas velocidades mais altas, podem tornar-se totalmente impraticáveis. Projetos modernos de bocais, nos quais o rebolo é usado como bomba para conduzir o refrigerante para zona de retificação, pode reduzir os requisitos de pressão do refrigerante em 90% (Hitchiner, 2001).

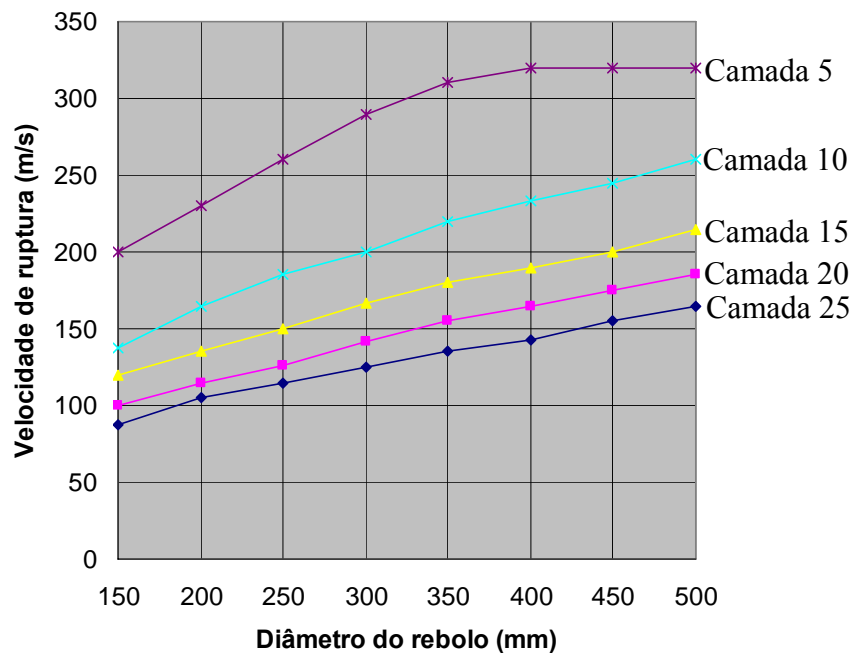


Figura 2.9 – Efeito do diâmetro do rebolo e profundidade da camada na velocidade de ruptura da camada abrasiva (Hitchner, 2001).

2.5 Ferramentas de corte para o processo de retificação

As ferramentas de corte empregadas no processo de retificação são compostas de materiais abrasivos, ligantes e poros. A sua relação volumétrica define a estrutura do rebolo, e assim também propriedades como dureza e porosidade. Dentre as ferramentas empregadas nos processos com ferramentas de corte de geometria não definida, as rotativas, denominadas rebolos, encontram maiores aplicações (König, 1980; SME, 1988).

Os rebolos usados na retificação de alta velocidade são constituídos de um corpo metálico ou de resina reforçada com fibras, revestido com uma camada de materiais abrasivos de alta dureza (diamante e nitreto de boro cúbico), também chamados de superabrasivos. A quantidade de superabrasivos por unidade de volume determina as características deste

revestimento abrasivo. A camada abrasiva pode ser colada, ser fixa galvanicamente ou ser sinterizada ao corpo do rebolo. No exemplo da Figura 2.10 é mostrada a secção de um rebolo projetado para a velocidade periférica de 500 m/s com revestimento superabrasivo fixo galvanicamente ao corpo do rebolo.

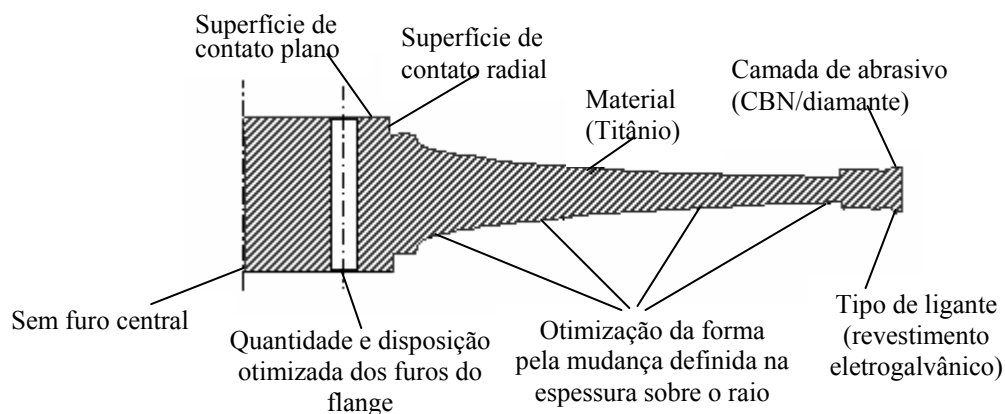


Figura 2.10 - Rebolo com corpo de titânio e revestimento superabrasivo fixo galvanicamente (König & e Ferlemann, 1991).

O corpo do rebolo responde pelas características de tenacidade que a ferramenta deve possuir. Dependendo do tipo de abrasivo e das características desejadas na retificação, o corpo pode ser composto de alumínio com resina, resinas sintéticas, aço, alumínio, titânio ou mesmo de materiais cerâmicos. Um corpo de alumínio leva a um baixo amortecimento, mas uma boa dissipação de calor e uma elevada resistência mecânica da ferramenta (König, 1980; König & Ferlemann, 1991; Brinksmeier & Brockhoff, 1996; Bastos, 1999; Taborga, 2002).

O reforço de corpos de rebolos com fibras de vidro e fibras de carbono permite uma redução do peso do corpo do rebolo em relação aos metálicos em até 60%, o que diminui a solicitação dos mancais dos eixos-árvores das máquinas. Simultaneamente, as vibrações no processo são drasticamente reduzidas.

Segundo Malkin (1989), quando rebolos revestidos com materiais superabrasivos são utilizados no processo de retificação, cerca de 20% do calor gerado no processo flui para a peça, sendo que, no caso dos rebolos convencionais de óxido de alumínio, essa porcentagem está em torno de 60 a 75%. A menor quantidade de calor gerada pelo rebolo de CBN permite uma redução nas temperaturas da região de corte.

De acordo com Pung (1988), Kohli et al. (1995), Rowe et al. (1996) e Silva Neto & Silva (2001), as menores temperaturas geradas pelo CBN são em função da elevada dureza de

seus grãos abrasivos, que mantém a capacidade de corte durante maiores tempos (razão de o desgaste ser reduzido), diminuindo assim o desgaste dos mesmos e reduzindo as parcelas de energias referentes à deformação plástica sem remoção de material e ao deslizamento de grãos cegos. Também pode ser atribuída a maior condutibilidade térmica do grão de CBN (1300 W/mK^{-1}), contra 29 W/mK^{-1} do grão de Al_2O_3 , valores obtidos a 25°C . Com isto, uma quantidade maior de calor pode ser retirada da região de corte pelo rebolo de CBN, impedindo que esse seja transportado para peça.

2.5.1 Materiais abrasivos

Os materiais abrasivos devem possuir algumas propriedades específicas para então poderem remover materiais. Entre as mais importantes propriedades tem-se: dureza, friabilidade, resistência ao atrito, estabilidade térmica, estabilidade química e resistência à compressão (Fig.2.11).

Os abrasivos usados na retificação são classificados em materiais abrasivos naturais e sintéticos. Os mais usados são os abrasivos sintéticos, que podem ser convencionais ou superabrasivos. Dentre os abrasivos sintéticos, os mais comuns são: abrasivos convencionais - óxido de alumínio e carboneto de silício, e os superabrasivos - nitreto de boro cúbico (CBN) e diamante.

Dentre os materiais abrasivos convencionais sintéticos, tanto o carboneto de silício (SiC) com dureza Knoop, $K_{100} = 2500 \text{ kgf/mm}^2$, quanto o óxido de alumínio (Al_2O_3) com dureza Knoop, $K_{100} = 2000 \text{ kgf/mm}^2$ (Fig. 2.11), têm variações de pureza na sua fabricação e, com isto, existe também variação nas propriedades e no custo desses tipos de abrasivos (König, 1980).

Os materiais superabrasivos, diamante e CBN, denominação essa dada devido à dureza Knoop ser maior que 2000 kgf/mm^2 , possuem propriedades que os abrasivos convencionais não possuem (Shaw, 1996).

Os abrasivos naturais, com exceção do diamante, não dispõem de resistência mecânica suficiente e sua qualidade não pode ser controlada de uma forma tão eficiente e reproduzível como nos produtos sintéticos, logo, têm uma importância apenas secundária (König, 1980).

O diamante é o material conhecido de maior dureza e pode ser utilizado na sua forma natural ou sintética. O diamante natural se formou em condições de pressões extremas e em temperaturas elevadas, durante um longo período de tempo.

Uma diferenciação fundamental entre os tipos de diamantes é realizada através de sua estrutura. Em aplicações de engenharia, tanto o “diamante monocristalino” quanto o “diamante policristalino” são usados. Diamantes de alta qualidade têm formas octaédricas regulares com bom crescimento do cristal, sem inclusões e livre de falhas (Lierse & Kaiser, 2002).

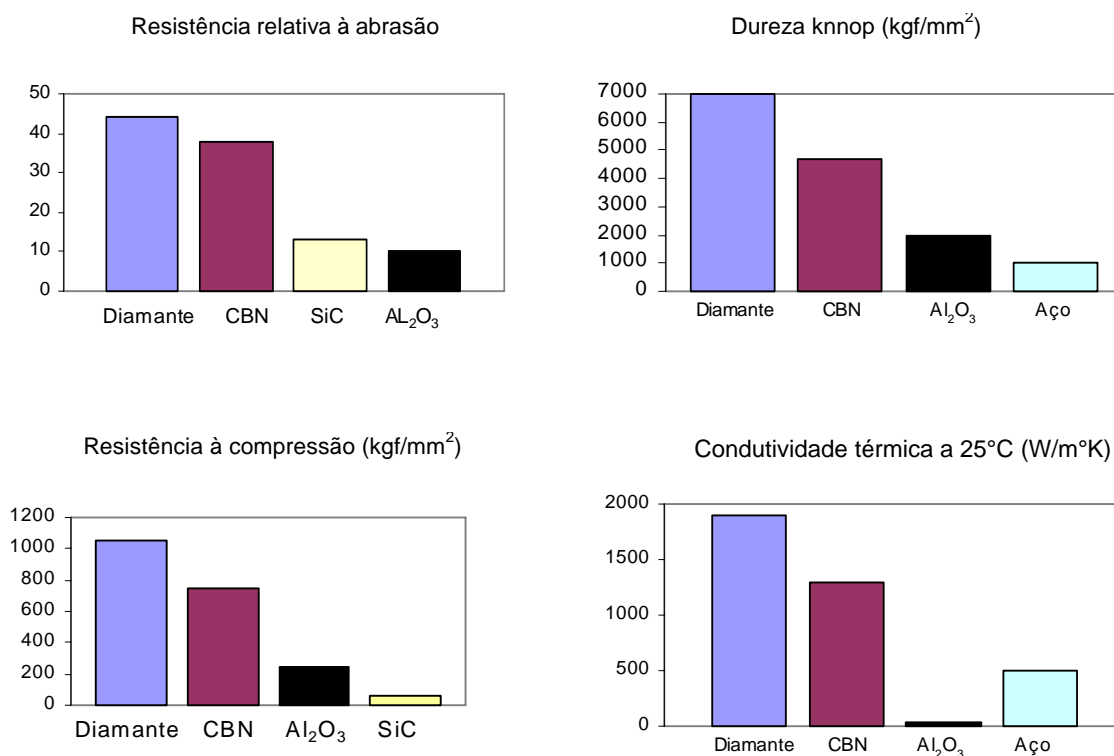


Figura 2.11 - Características físicas de alguns materiais (Carius, 2000).

A dureza Knoop do diamante varia de $K_{100} = 5000$ a 7000 kgf/mm^2 , dependendo da orientação cristalina, sendo aproximadamente três vezes maior que a dureza dos abrasivos convencionais (Fig. 2.11). O diamante sintético é produzido submetendo a grafita a elevadas temperaturas e pressões em presença de um catalisador como o níquel ou outro material do grupo VIII da tabela periódica. Se for utilizado o níquel como catalisador, a transformação da grafite em diamante ocorre em aproximadamente 2000°C e $75 - 95 \text{ kbar}$ (Shaw, 1996).

Dependendo da temperatura, pressão e tempo do processo de fabricação, os diamantes formados têm um tamanho e uma estrutura variável. Os materiais abrasivos de diamante sintético variam desde grãos policristalinos (PCD) com estrutura simples, formato irregular, fracos e quebradiços até cristais cúbicos octaédricos.

Os diamantes monocristalinos (MCD), que são mais fortes, são utilizados com ligante de metal para processos de corte de cerâmica, pedra, vidro e outros materiais duros e frágeis. Diamantes monocristalinos (MCD) são produzidos pela técnica de síntese em alta pressão em

tamanhos de poucos mm^3 e então cortados por laser em troncos medindo, por exemplo, $1 \times 1 \times 4 \text{ mm}$. A orientação cristalina dentro do tronco é 100 e, por causa disso, na direção de orientação desses diamantes tem-se a máxima dureza.

Diamantes policristalinos (PCD) com uma fase ligante consistem de partículas de diamantes sintéticos envolvidos pelo ligante (cobalto ou tungstênio) no processo de sinterização. O tamanho de um grão típico do PCD fica entre 2 e $25 \mu\text{m}$. Por causa dos seus componentes de fase ligante, o PCD com fase ligante é a mais “mole” que o diamante cristalino.

O desenvolvimento da deposição química de vapor (CVD) em 1980, tornou possível a produção de diamantes policristalinos sintéticos sem fase ligante em dimensões muito grandes. A grande vantagem do diamante CVD está em sua alta resistência à fratura por causa da sua estrutura policristalina homogênea.

O emprego do diamante na retificação da maioria dos materiais ferrosos não é econômico, exceto para aços de elevado teor de carbono e para a retificação de ferro fundido. Devido à grafitização e difusão do carbono para o ferro não saturado em carbono ocorre um excessivo desgaste do diamante. Sob ação de uma pequena pressão, o diamante apresenta grafitização a partir de 900°C e a partir de 1400°C o diamante oxida (König, 1980). A Figura 2.12 mostra o comportamento da dureza do diamante, do CBN, do óxido de alumínio e do carboneto de silício, como função da temperatura (Klyk, 1993).

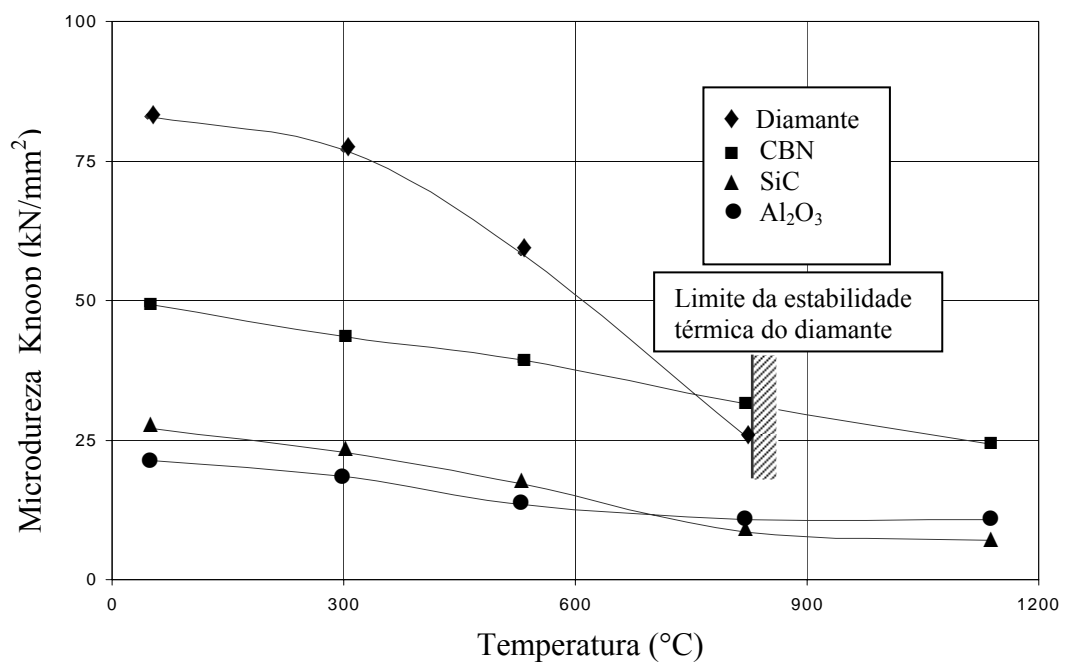


Figura 2.12 – Microdureza dos materiais abrasivos como função da temperatura (Klyk, 1993).

Durante o processo de corte, para temperaturas acima de 700 °C a dureza do CBN passa a superar a dureza do diamante e a 800 °C o diamante perde a sua estabilidade (Ault, 1978). A degradação do diamante com o aumento da temperatura acontece devido à combinação do carbono com o oxigênio, já no CBN ocorre a oxidação formando o óxido de boro, que forma uma camada apassiva dificultando novas reações.

O diamante e o CBN possuem uma condutividade térmica bem maior em relação Al_2O_3 e SiC. Devido a essa propriedade, na fabricação de rebolos superabrasivos resinoides os grãos superabrasivos são revestidos com níquel, cobalto ou ligas metálicas que agem como bloqueadores do calor dissipado pelo grão, evitando a destruição prematura do ligante (Taborga, 2002; Shaw, 1996). Esse revestimento também aumenta a resistência de ligação entre grão abrasivo e ligante. Diamantes revestidos e com configurações cristalinas controladas expandiram a aplicação desse abrasivo para retificação de não ferrosos dúcteis (Stemmer, 1992).

O Nitreto de boro cúbico (CBN) não é encontrado na natureza, e foi primeiramente sintetizado pela GE superabrasivos no ano de 1957. Mais de uma década depois, passou a ser empregado como material abrasivo para os processos de fabricação. A introdução do CBN no universo da usinagem representou um avanço significativo no âmbito da fabricação de ferramentas de corte, da mesma forma que impulsionou o desenvolvimento da tecnologia da retificação.

Os grãos de CBN podem ser produzidos de forma microcristalinas, quando algum catalisador é utilizado, ou de forma monocristalina quando não é utilizado catalisador. Os CBN microcristalinos são mais tenazes que os monocristalinos e dão melhores resultados na retificação de materiais endurecidos (Shaw, 1996).

O CBN monocristalino, que depende de um desgaste por macrolascamento para gerar gumes afiados, pode ser de média ou alta tenacidade. Os grãos de CBN, de formas irregulares, são apresentados em duas qualidades básicas: uma com recobrimento de 60%, em peso, de níquel, recomendado especialmente para ferramentas com ligante resinóide, para moderar a condução de calor para o ligante (Carius, 2000), e a outra, sem recobrimento, é utilizada em ferramentas de ligante vitrificado e de ligante metálico. A tabela 2.1 mostra as aplicações mais comuns para os abrasivos de CBN, o revestimento aplicado no grão e os ligantes mais utilizados na fabricação de rebolos superabrasivos, segundo recomendação do fabricante (GE superabrasivos, 1998).

Tabela 2.1 – Grãos de CBN, ligantes, revestimento e aplicações (GE superabrasivos, 1998).

CBN	Ligante	Revestimento	Aplicação
Tipo I	V, E	Sem revestimento	Retificação de girabrequim, aços ferramentas e aços ligas em geral.
Tipo II	R	Níquel (60%)	Retificação de girabrequim, aços ferramentas e aços ligas em geral.
400	V, E	Sem revestimento	Retificação de ferramentas e matrizes.
420	R	Níquel (60%)	Retificação de ferramentas e matrizes.
500	V, E	Sem revestimento	Retificação de aços endurecidos, materiais a base de níquel e cobalto, aços ligas.
510	V, M	Titânio	Retificação de aços endurecidos, materiais a base de níquel e cobalto, aços ligas.
520	R	Níquel (60%)	Aços ferramentas duros, ligas de aço e carbono.
550	M, V	Sem revestimento	Retificação de ligas de aço e ferramenta duros, superligas a base de cobalto.
560	R	Níquel (60%)	Aços ferramentas duros, aços carbono e aços ligas.
570	E, V	Sem revestimento	Aços ligas duros e superligas a base de níquel e cobalto
1000	V, E	Sem revestimento	Retificação de girabrequim, ferramentas e materiais aeroespaciais.

Os abrasivos CBN são caracterizados pelas seguintes propriedades:

- Elevada resistência ao desgaste, sendo o segundo material mais duro, $K_{100} = 4700 \text{ kgf/mm}^2$, independente da orientação dos cristais, inferior somente ao diamante: O CBN tem desgaste mais lento que o Al_2O_3 ou SiC , isso significa que a exatidão de forma da ferramenta é mantida ainda depois de longos períodos de uso (Taborga, 2002).
- Estabilidade térmica: O CBN tem uma elevada estabilidade térmica acima de temperaturas de 1000°C . Em decorrência dessa boa estabilidade ele é considerado bom para a retificação de aço. O diamante pode ser somente utilizado até uma temperatura de 800°C por causa da grafitização (Taborga, 2002).
- Estabilidade química: Apesar das elevadas temperaturas e pressões presentes na zona de contato, os grãos de CBN são menos propensos a reações químicas. Os grãos de CBN são aquecidos a uma temperatura de 1200°C em ar seco durante a retificação, criando-se um revestimento de óxido de boro. Esse revestimento age como uma camada protetora quando o grão de CBN está trabalhando. Quando os grãos são aquecidos em atmosfera de vapor de água, não são revestidos com essa camada protetora. O CBN reage com o vapor de água formando amônia e ácido bórico, pela reação:



Os grãos apresentam uma superfície com fissuras e marcas perdendo parte de sua massa. Esse defeito pode ser evitado, usando óleo como fluido de corte (Taborga, 2002).

- Elevada condutividade térmica: Os grãos CBN possuem uma elevada condutividade térmica, cerca de três vezes maior do que a do cobre. Essa propriedade permite a rápida dissipação de calor da zona de contato rebolo-peça (Taborga, 2002).

- Resistência à compressão: Também se pode entender como resistência à compressão de um grão abrasivo, sua capacidade de resistir às forças encontradas na retificação quando se está removendo uma determinada quantidade de material. Essas forças atuam praticamente de forma compressiva, sobre o grão. Fazendo uma comparação da resistência à compressão do CBN em relação a outros abrasivos (Fig. 2.9), o CBN é o segundo material mais resistente à compressão, 720 kgf/mm^2 , inferior somente ao diamante, que tem 1065 kgf/mm^2 (Taborga, 2002).

A elevada dureza do CBN, associada à elevada condutividade térmica, permite a realização do “corte a frio”. Nesse caso, o processo caracteriza-se pelas temperaturas relativamente baixas e forças elevadas de penetração para os grãos individuais (Taborga, 2002).

2.5.2 Ligantes

Os ligantes ou aglomerantes servem para tornar possível a união dos grãos abrasivos. Sua função é manter a grão aprisionado até que este esteja sem capacidade de corte. Nesse instante, o ligante deve liberar o grão abrasivo para que os grãos posicionados em camadas mais profundas, ainda afiados, possam entrar em ação. Os ligantes devem ser suficientemente fortes para resistir às forças de retificação, temperaturas e forças centrífugas sem se desintegrarem, como também devem possuir resistência química para resistir às reações químicas devido à interação rebolo/peça/fluido de corte. Como ligante, a indústria de abrasivos utiliza materiais inorgânicos e orgânicos. Dentre esses materiais, os mais importantes são os ligantes cerâmicos (vitrificados) e os metálicos, que são ligantes inorgânicos, e os resinóides, que são ligantes orgânicos. Os ligantes metálicos podem ser sinterizados ou depositados galvanicamente (eletroquímicos). Atualmente, existem quatro classes de ligantes mais utilizados com rebolos superabrasivos: metálicos sinterizados, resinas, cerâmicos e eletroquímicos (tabela 2.2).

Os ligantes metálicos utilizados com superabrasivos são mais resistentes ao calor, quando comparados aos ligantes de resina, e mais resistentes ao impacto, quando comparados aos ligantes vitrificados.

Tabela 2.2 - Propriedades básicas dos sistemas de ligantes (Firma diametal, 2004).

Ligante	Capacidade de corte	Estabilidade da forma	Resistência à temperatura	Condutividade térmica	Capacidade de dressamento
Resina	↑	→	→	→	↑
Metálico sinterizado	→	↑	↑	↑	→
Cerâmico	↑	→	↑	↓	↑
Eletroquímicos	↑	↑	↑	↑	↑

↑ = Excelente → = Bom ↓ = Inadequado

Os ligantes metálicos estão dentro da classificação dos ligantes mais fortes. Devido a essa característica, os rebolos superabrasivos com este ligante são utilizados em aplicações que exigem condições de exatidão, previsibilidade e economia na remoção de materiais. A tenacidade deste tipo de ligante permite que ele seja utilizado para condições de retificação interrompida. Nos usos em que são recomendados, os ligantes metálicos oferecem tempo superior de conservação do perfil e uma vida longa.

Já para retificação de metais duros e cerâmicos de alta densidade, as desvantagens são maiores que as vantagens. O material mais comum desse tipo de ligantes é o bronze sinterizado. As variações dos graus desses rebolos são controladas adicionando modificadores e alterando a composição do bronze. Pesquisas recentes empregam o bronze de prata (70% de Ag + 30% de Cu + 1 – 5% de Ti na liga eutética prata-cobre), podendo ou não ser acrescidos de carga (metal duro, cerâmica, carbonetos). Esta liga reage com o diamante gerando uma forte ligação entre o diamante e o bronze. A interface é de carboneto de titânio.

Outros ligantes de pó de metal são: o ferro e o níquel, os quais são geralmente mais fortes que o ligante de bronze.

Os ligantes metálicos eletroquímicos são empregados para fixar uma camada singular de abrasivos geralmente com níquel, pelo processo de eletrodeposição (Galen, 2001). Estes ligantes permitem o trabalho dos rebolos com elevadas velocidades (iguais ou maiores do que 120 m/s), quando alcançam seu máximo desempenho em relação à vida do rebolo. Esse tipo de rebolo é mais econômico para um tempo de funcionamento considerado curto na

retificação de formas complexas. É de fácil utilização, pois o perfilamento e a afiação não são normalmente necessários, portanto, não é necessário equipamento sofisticado para manter a forma e o tamanho do rebolo, embora algumas indústrias utilizem o método de dressamento por toque, *touch dressing*, quando o rebolo é utilizado quase de uma forma contínua. Em alguns casos é difícil de obter um acabamento fino com esses rebolos, porque o espaço entre grãos abrasivos é relativamente grande, quando comparado a outras estruturas. Cerca de 40% da dimensão do grão estão expostas, e pode penetrar na peça quase todo esse valor. Em decorrência disso a taxa de remoção pode ser elevada, mas o acabamento da superfície pode ser inferior aos obtidos por outros rebolos que utilizam outros tipos de ligantes com grãos abrasivos do mesmo tamanho.

Depois dos ligantes cerâmicos (vitrificados), os ligantes de resina são os mais usados na fabricação de rebolos, proporcionando rebolos elásticos. Foram especialmente desenvolvidos para rebolos de diamante, já que o diamante não resiste às altas temperaturas necessárias à sinterização de rebolos cerâmicos. As resinas fenólicas, que permitem a ligação dos grãos superabrasivos, são geralmente misturadas com materiais de enchimento. Esse tipo de ligante permite ao rebolo trabalhar a seco. Quando se tem estrutura suave, pode-se trabalhar efetivamente com retificadoras de baixa potência de motor do rebolo e baixas velocidades de peça. Um fator desfavorável dessas resinas é a baixa condutividade térmica; o calor gerado na retificação deteriora a resina fenólica junto com o abrasivo.

As resinas polímidas são as mais versáteis quanto ao sistema de ligação dos abrasivos. Elas podem ser fortes, frágeis e dúcteis, dependendo da aplicação. Em decorrência de uma maior resistência desse tipo de resina, é utilizada pequena quantidade de ligante. Outros materiais podem ser adicionados para tornar essa estrutura termicamente mais condutiva ou mais resistente à abrasão (Galen, 2001).

Os ligantes cerâmicos (vitrificados) são misturas de materiais como argilas, silicatos, feldspato e fundentes, fundidos com uma consistência semelhante ao vidro. Os ligantes vitrificados tendem a ser mais fortes que os ligantes de resinas, e oferecem a principal vantagem de poder modificar sua estrutura. Conforme os parâmetros de condicionamento, sua estrutura pode ser facilmente modificada para obter um rebolo duro ou mole. Também pelo mesmo método, pode-se modificar sua topografia. Essas modificações permitem alcançar uma ampla faixa de taxas de remoção. Algumas de suas principais propriedades são listadas a seguir (König, 1980):

- Frágeis, e em decorrência disto pouco resistente a impactos;

- Grande agressividade dos grãos abrasivos, em virtude da estrutura que resulta bastante porosa;

- Inelasticidade, em virtude da dureza do ligante;
- Resistentes à alta temperatura, mas não resistente à variação de temperatura;
- Resistente quimicamente em relação ao óleo, água, fluidos de corte, ácidos, etc.

Embora os superabrasivos tenham elevada condutividade térmica, as temperaturas alcançadas durante a fabricação de rebolos com ligantes vitrificados poderiam influenciar sua estabilidade térmica. Isso faz pensar que os CBN podem ser fabricados a maiores temperaturas que o diamante, mas o CBN é suscetível a reações químicas com a água, e compostos presentes na maioria dos materiais utilizados para fabricar esses ligantes nas temperaturas acima de 800°C. Atualmente, estão sendo utilizados recobrimentos muito finos para proteger a superfície dos grãos CBN durante a fabricação de rebolos vitrificados (Malkin, 1985). A cerâmica consegue fixar os grãos de CBN quimicamente para o aproveitamento total do mesmo. A fabricação ocorre por meio de um sistema estrutural volumétrico. O volume total de grãos consiste em um determinado volume de CBN e outro de grãos de apoio, que é um material convencional de retificação e não tem função de arrancar cavacos, servindo apenas para a fixação e a formação da estrutura do rebolo. A distância entre os grãos de CBN é aumentada, por isso, em muitos casos, reduz-se o perigo de danos térmicos nas peças, causados por microrranhuras e estrias (Yegenoglu & Fischbacher, 2004).

Devido a sua porosidade, esse tipo de ligante é adequado para materiais de cavaco longo. Também se recomenda utilizar onde é desejada uma retificação úmida de certos tipos de aço, a estrutura porosa permite um maior fluxo de fluido, através dos poros entre os grãos (Taborga, 2002). Em máquinas que possuem dressamento automático, enquanto a máquina está funcionando, permite manter a geometria e o acabamento desejados sem prolongar muito o tempo de interrupção do ciclo de retificação. Por esse motivo, o rebolo CBN vitrificado é a opção mais econômica, quando se está retificando grandes volumes de material em peças como virabrequins e comando de válvulas (Galen, 2001).

2.5.3 Estrutura do rebolo

A dureza do rebolo equivale à resistência que ele oferece à remoção dos grãos. A dureza é dependente não só do tipo do ligante e do material, mas também da estrutura do rebolo, isto é, da sua composição volumétrica em termos do percentual de grãos, de ligante e poros, e de sua distribuição.

O volume total de um rebolo (V_t) pode ser expresso como a soma das parcelas do volume de grãos, volume do ligante, volume de partículas de enchimento e volume de poros.

Na Figura 2.13, tendo-se como base a estrutura aberta de (a), é possível aumentar a dureza do rebolo por meio do aumento do volume do ligante, já que, mantido o volume de grãos, o volume de poros diminui. É o que se observa em (b), com maior espessura das pontes de ligação proporcionando um aumento da resistência ao arrancamento de grãos. Em (c) o volume de abrasivo inicial é aumentado em detrimento do volume de poros, o que leva, igualmente, a um aumento da dureza do rebolo. Em (d), o aumento do volume de grãos e a diminuição do volume de ligante, mantido o volume de poros inicial, pode levar a um aumento de dureza do rebolo, pois há uma participação de maior quantidade de grãos abrasivos duros no processo, o que minimiza o desgaste individual e diminui a taxa de arrancamento dos grãos. Em (e), é mostrado o aumento dos volumes dos grãos e do ligante em detrimento do volume de poros. Obtém-se um considerável aumento de dureza, mas em contrapartida, há uma acentuada diminuição da capacidade do rebolo de remover cavacos, uma vez que os poros, que têm a função de absorver os cavacos, são praticamente inexistentes.

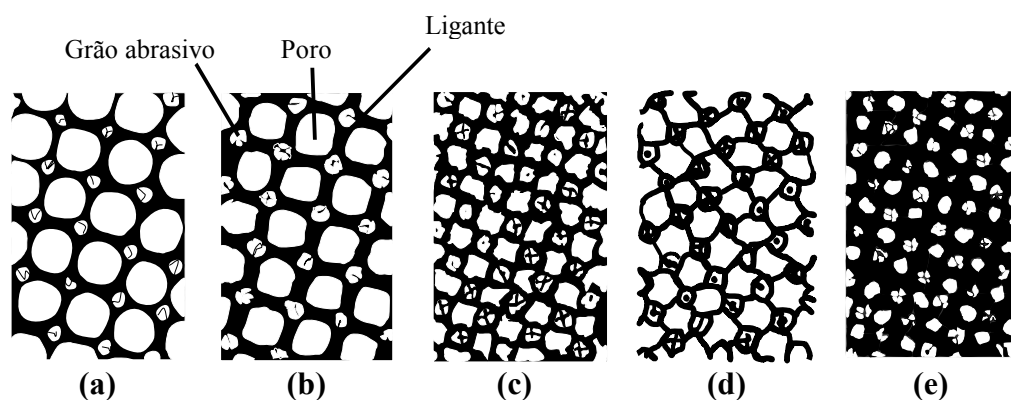


Figura 2.13 - Estruturas de rebolos (König, 1980).

2.5.4 Desgaste do rebolo

O desgaste do rebolo pode ser quantificado pelo desgaste radial (Δr_s) e pelo desgaste de quina (Δr_{sk}), conforme Figura 2.14.

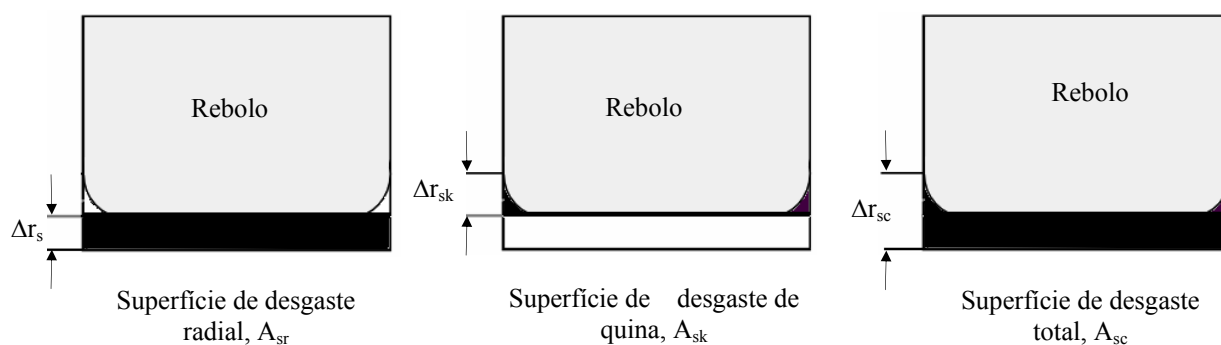


Figura 2.14 - Representação esquemática do desgaste radial Δr_s e de quina Δr_{sk} (König, 1980).

Na retificação os danos térmicos atingem não só a peça, mas também a ferramenta. A Figura 2.15 mostra que o desgaste dos grãos abrasivos tem início nas camadas cristalinas próximas à camada superficial do grão abrasivo. Nessas camadas, as pressões de contato e as temperaturas extremamente altas favorecem a ocorrência de fenômenos de oxidação e de difusão que reduzem a resistência abrasiva do material. Forma-se uma camada menos resistente à compressão que devido à ação mecânica subsequente é removida por abrasão e, com isso, novas camadas cristalinas do grão abrasivo vão sendo submetidas a esse tipo de desgaste (König, 1980).

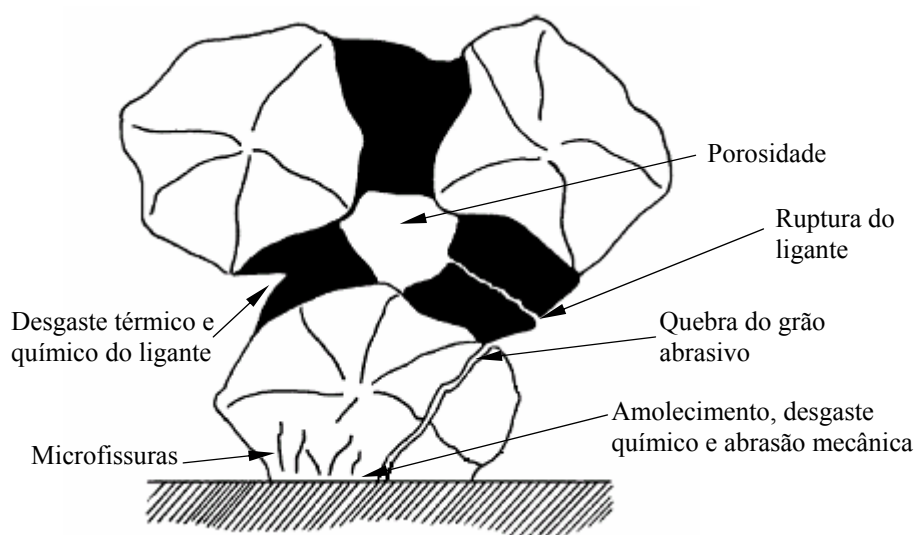


Figura 2.15 - Tipos de desgaste do grão abrasivo (König, 1980).

Pela ação mecânica e térmica, alternadamente, é possível ocorrer fadiga em locais com falhas que podem ser encontradas em todo o material (na forma de impurezas na estrutura cristalina, em contornos de grão, variações de dureza e etc.), onde iniciam as fissuras de

fadiga. Essas fissuras podem se propagar e levar ao lascamento de partes do grão ou podem provocar a formação de uma microfissura (micro-desgaste) que pode levar ao fissuramento de grandes partes do grão abrasivo (macro-desgaste). Em muitos casos, o desgaste do grão abrasivo é a causa imediata para o desgaste do ligante, pois devido ao achatamento do gume tem-se um aumento da força de atrito, que leva a um aumento localizado na força de corte e, com isso ultrapassa-se a resistência mecânica do ligante. É possível ocorrer a quebra de vários grãos em cadeia, dependendo de como o grão está ancorado no ligante. Esse desgaste pode estar mais localizado no grão ou mais no ligante. O ligante também pode sofrer um desgaste diretamente pela ação térmica ou química do meio, liberando o grão abrasivo prematuramente (Schroeter, 2000). O desgaste localizado na superfície do grão é considerado como sendo o desgaste de micro-efeito e o desgaste de lascamento de grão e ruptura do ligante é considerado como um macro-efeito.

2.5.5 Condicionamento do rebolo

A palavra “condicionamento” é utilizada como termo genérico para as operações de preparação das ferramentas de corte empregadas na retificação (Leme, 1999).

Para assegurar boas condições operacionais ao rebolo é necessário fazer distinção entre a operação de limpeza do rebolo, que tem por objetivo remover restos de cavacos, grãos e partículas aderidas ao rebolo, e o dressamento, que pode ser subdividido em operações de perfilamento e afiação. Perfilamento é a operação para dar forma a um rebolo, seja para fazê-lo girar corretamente centrado, sem batimentos, ou para dar ao rebolo um perfil especial, capaz de reproduzir corretamente a forma desejada. Afiação consiste em remover grãos arredondados e cegos (rebolo espelhado), proporcionando a recuperação da capacidade de corte da ferramenta ao conferir uma protusão maior dos grãos abrasivos. O dressamento é realizado sempre que o rebolo perde a sua capacidade de gerar peças dentro dos padrões de qualidade para os quais se aplica.

Na retificação busca-se, primordialmente, a manutenção das baixas tolerâncias dimensionais através da minimização do desgaste volumétrico do rebolo, que é realizado com a utilização de rebolos com maior capacidade de retenção dos grãos abrasivos. Com o passar do tempo, entretanto, esta situação gera perda de agressividade da superfície de trabalho do rebolo. Assim, a operação de dressamento passa a fazer parte integrante do processo.

Os resultados da retificação são altamente influenciados pelas condições topográficas da superfície de trabalho do rebolo. Um rebolo gasto produzirá muito calor devido ao atrito e

às vibrações, que podem prejudicar a resistência e a integridade da superfície do produto final. Uma vez que o procedimento de dressamento provoca uma modificação na topografia da ferramenta, ele deve ser muito bem conhecido para que se tenha um maior controle sobre o desempenho da operação.

O dressamento possui três finalidades principais:

- A obtenção de concentricidade entre a superfície de trabalho do rebolo e o seu eixo de rotação;
- O perfilamento do rebolo para a obtenção da forma;
- A fratura e/ou remoção dos grãos abrasivos gastos para adequar a agressividade do rebolo à aplicação (Silva & Coelho, 1998).

A definição do momento de dressar o rebolo é fundamental na retificação. Se feito de maneira conservadora, seja, antes do fim da vida do rebolo, ocorrerá um desperdício de abrasivo e, principalmente, um aumento do tempo de processo, pelo maior número de dressamentos realizados. Uma utilização do rebolo além de sua vida acarretará à rejeição da peça. Na indústria, a decisão do momento de dressamento é feita, em geral, por operadores da máquina, baseados na variação do ruído gerado pelo processo (Wakuda & Inasaki, 1991). A Emissão Acústica vem oferecendo uma alternativa para o reconhecimento automático do fim de vida do rebolo e está sendo amplamente estudada para esta aplicação (Oliveira, 1992).

Para operações de dressamento, utiliza-se uma variedade de ferramentas, como:

- **Bastões dressadores:** são prismas de abrasivos (Al_2O_3 ou SiC) ligados, usados para remover a carga de rebolos diamantados, para rebolos de afiação de ferramentas e para quebrar cantos em rebolos utilizados em retíficas sem centros (Silva & Coelho, 1998).

- **Discos dressadores:** são discos de liga metálicos impregnados com diamantes, com funcionamento semelhante ao de um rebolo. São usados para obter o giro concêntrico de rebolos de diamante e de CBN e também de rebolos para operação de desbaste. A escolha do disco é determinada pelo tipo de operação. Discos com grãos finos são utilizados para dressar e perfilar rebolos diamantados, enquanto discos com grão grosso são aplicados em rebolos de outros abrasivos (Silva & Coelho, 1998).

- **Dressadores de ponta única:** são constituídos por um corpo ou suporte em que é fixado o diamante de ponta única. São utilizados para perfilar e dressar rebolos para operações de retificação, como retificação plana, cilíndrica, *centerless* e interna. Pontas simples de diamante, quando usadas em rebolos duros, largos e de grande diâmetro podem ficar com áreas achatadas que cegam o rebolo nas operações subsequentes de dressamento. Para

prevenir esta situação, são utilizados múltiplos diamantes alinhados (conglomerado) (Silva & Coelho, 1998).

- **Rolos dressadores:** de formas especiais, estão encontrando uso em muitas operações, com a vantagem de assegurar uma forma geométrica mais precisa no rebolo e, conseqüentemente, na peça retificada (Silva & Coelho, 1998).

De acordo com Graf (2004), a dressamento tem função de avivar os grãos abrasivos do rebolo e dar a forma ideal aos mesmos, pois a topografia desses pode ser alterada, mudando-se as condições de dressamento como, por exemplo, o grau de recobrimento a ser empregado no processo. O grau de recobrimento U_d , no dressamento com dressador de ponta única, determina quantas vezes um ponto da superfície do rebolo é recoberto pela largura útil do dressador e pode ser expresso pela Equação 2.7 (Oliveira, 1988).

$$U_d = \frac{b_d}{s_d} \quad 2.7$$

Onde: b_d é a largura de atuação do dressador;

S_d é o passo de dressamento (avanço do dressador por rotação do rebolo);

A largura de atuação do dressador (b_d) é em função do raio da ponta do dressador (r_p) e da profundidade de dressamento (a_d) (equação 2.8).

$$b_d = \sqrt{8 \cdot r_p} \cdot a_d \quad 2.8$$

O grau de recobrimento tem a vantagem de considerar as variáveis a_d , S_d e também a geometria do dressador e sua variação de forma por desgaste.

A Figura 2.16 mostra a cinemática do dressamento com diamante de ponta única.

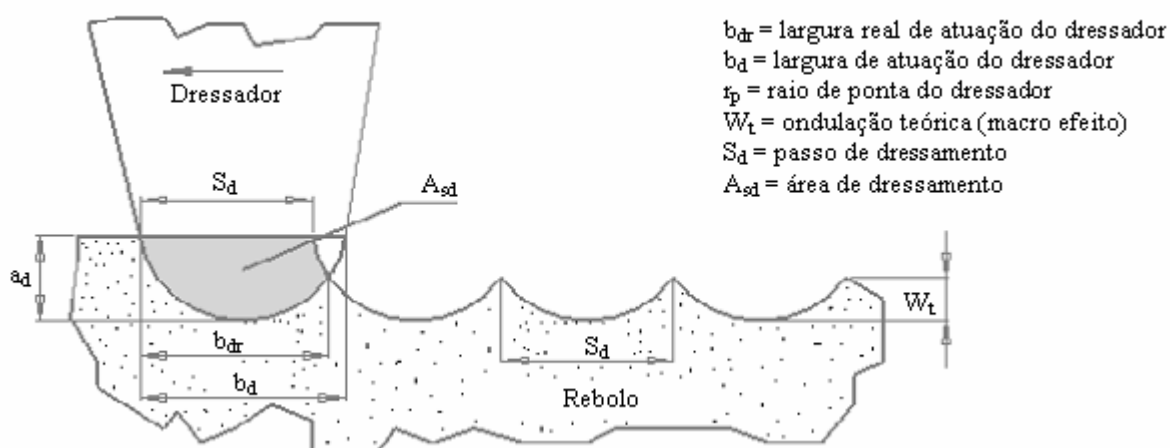


Figura 2.16 – Cinemática do dressamento com diamante de ponta única (Oliveira, 1992).

Com aumento de U_d (para $U_d > 1$) a agressividade diminui. Na prática não é utilizado um grau de recobrimento menor que um, pelo fato de ficarem partes de rebolo sem acondicionamento, (Fig. 2.17). A máxima agressividade é obtida quando o grau de recobrimento é igual a um. Uma agressividade alta significa que existe menor quantidade de gumes, portanto cada gume tem que remover maior quantidade de material. Uma agressividade de rebolo baixa significa que existe uma maior quantidade de gumes, mas geralmente, os gumes têm uma área plana desgastada maior. Para rebolos dressados com graus de recobrimento maiores que 3,5 ($U_d > 3,5$) os efeitos de agressividade se assemelham, tornando esse valor um limite superior para o grau de recobrimento.

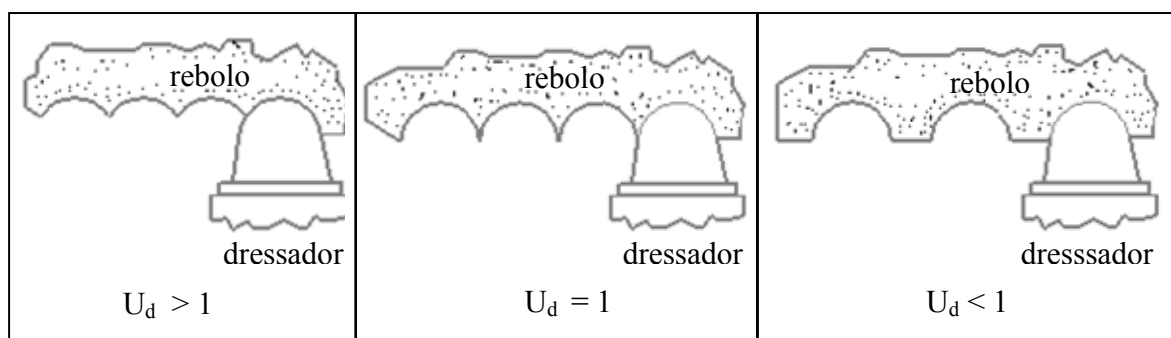


Figura 2.17 – Ação do grau de recobrimento sobre a topografia do rebolo (Oliveira, 1988).

2.6 Sistema de refrigeração no processo de retificação

Várias operações de corte têm sua eficiência melhorada pelo uso de fluidos de corte, com significativo aumento da produtividade e da qualidade das peças fabricadas. Os efeitos nas operações de fabricação dependem das características próprias dos fluidos de corte, das quantidades utilizadas e da eficiência da aplicação, além dos parâmetros relativos às condições de usinagem. Recentemente, tanto os efeitos quanto a eficiência estão sendo intensamente avaliados também pelo aspecto do impacto ambiental resultante da sua utilização.

Morawska et al, em 1995, bem como Teixeira et al, em 2000, analisaram dados de pesquisa científica no campo da ecologia e concluíram que a maioria dos problemas de poluição é proveniente dos descuidos tecnológicos, de falta de soluções no processo de fabricação e da conduta humana.

O desenvolvimento de formas alternativas não-nocivas de produção passou a ser de fundamental importância para a humanidade, uma vez que esse procedimento ajudará a conter os atuais níveis de poluição no mundo (Ramos et al, 2003).

Em cada processo de fabricação, o conjunto formado pela ferramenta, máquina e periféricos necessita de um estudo específico para atingir um desempenho otimizado. Os lubrificantes e refrigerantes usados no corte, representam até 20% do custo de fabricação (Sreejith & Ngoi, 2000). Por isso, devem ser analisados o uso exagerado desses fluidos e o método conveniente de aplicação. Por desconhecimento de técnicas de aplicação e manuseio, muitas indústrias ainda aplicam fluidos de corte em excesso, quando o uso poderia ser reduzido ou mesmo eliminado.

Dentre as operações em que o uso de fluido de corte apresenta vantagem, estão aquelas na qual o acabamento da superfície e/ou as tolerâncias dimensionais são críticos. São casos em que os fluidos de corte possuem função de lubrificação e refrigeração, garantindo bom acabamento da superfície e uma faixa de tolerância dimensional mais estreita, respectivamente.

Muitas vezes, os métodos convencionais de aplicação dos fluidos não alcançam boa eficácia em algumas operações de usinagem, especialmente sob condições de aplicação severas. Como exemplo, na retificação é necessário que o fluido vença a força centrífuga do rebolo e penetre na barreira de ar que circunda a ferramenta, devido ao seu movimento de rotação. Nesse caso, a falta de eficiência traz como conseqüências o desgaste prematuro da ferramenta e problemas na exatidão dos processos e produtos, o que aumenta o número de

afiações (dressamento ou perfilamento) durante uma operação de retificação (Ebbrel et al, 2000). Sem contar que nessas operações se gasta muito tempo e dinheiro com descarte de fluidos refrigerantes, lodo de retificação ou produtos químicos de limpeza.

Pelas razões citadas anteriormente, sob o ponto de vista econômico e ecológico, os fluidos de corte tornaram-se indesejáveis. A usinagem sem o uso do fluido de corte está se tornando cada vez mais popular em aplicações em que o uso desses fluidos não é necessário ou é de difícil aplicação. Naturalmente, na condição de usinagem a seco não se verificam as funções primárias e secundárias dos fluidos de corte, ou seja, refrigeração, lubrificação e transporte de cavacos. Em decorrência disso, podem ocorrer prejuízos relacionados a danos térmicos na peça e na ferramenta, aumento de atrito e das adesões e a dificuldade na retirada de cavacos. Assim, em alguns processos de usinagem, a exemplo da retificação, a operação sem fluido de corte ainda é impraticável (Ebbrel et al, 2000).

2.6.1 Fluido de corte

O processo de retificação é caracterizado por elevados níveis de energia por unidade de volume removido. Praticamente toda essa energia é transformada em calor na zona formação de cavacos. O calor gerado eleva a temperatura da região de formação de cavacos, podendo levar a consideráveis solicitações térmicas do rebolo e da peça. No rebolo, com a falta de refrigeração adequada, pode ocorrer um desgaste mais acentuado. Além disso, os poros, que têm a função de alojar momentaneamente os cavacos formados, são relativamente pequenos e para que se mantenha a capacidade de corte do rebolo, eles devem ser desobstruídos continuamente pela ação do meio lubri-refrigerante (Bertalan, 1997; Da Silva, 1999). No lado da peça podem surgir danos térmicos que no processo de retificação podem ser entendidos como as modificações das características físicas e/ou químicas da superfície retificada como também daquelas regiões as quais se localizam abaixo dessa superfície. Os danos térmicos mais comuns são: mudanças microestruturais, variação da dureza, áreas oxidadas e manchadas, empenamentos, deformações, trincas e perdas de tolerâncias (Weingaertner et al, 2001).

Ressalta-se que esta energia, a qual é transformada em calor pode ser gerada pelas seguintes causas (Malkin, 1989; Liao et al., 2000; Weingaertner et al., 2001):

- Energia de deformação do material (anterior ao processo de formação do cavaco);

- Energia gerada pela formação do cavaco (devido ao cisalhamento e ao atrito existente entre a face do grão e o cavaco formado);
- Energia gerada pelo atrito (entre o flanco do grão abrasivo e a peça; e entre o ligante do rebolo e a peça).

Segundo Malkin apud Silva (2000), o processo de retificação cilíndrica gera tensões residuais nas adjacências da superfície da peça acabada. Essas tensões podem vir a comprometer o comportamento mecânico do material. De acordo com Chen et al. (2000) e Weingaertner et al. (2001), as tensões residuais na retificação são geradas por três efeitos básicos: a expansão térmica e contração do material durante a retificação, as transformações de fases devido às altas temperaturas provindas da usinagem e as deformações plásticas causadas pelos grãos abrasivos do rebolo. As tensões residuais de tração são criadas, principalmente, por tensões introduzidas pelo ganho térmico e deformações associadas com as temperaturas de retificação. Com isso, seu gradiente acaba ocorrendo da superfície para o interior da peça. Já as tensões de compressão são, predominantemente, geradas por interações mecânicas dos grãos abrasivos do rebolo com a peça (Malkin, 1989). Segundo Monici (2003), analisando-se as tensões residuais, observa-se que as tensões de compressão são favoráveis às propriedades mecânicas do material, pois aumentam a sua resistência à fadiga. Por outro lado, as tensões residuais de tração são danosas, causando a diminuição das resistências mecânica e a corrosão dos materiais, além da redução da resistência ao desgaste a altas temperaturas.

Com o objetivo de limitar as altas temperaturas geradas no processo e com isso os danos térmicos na peça e o desgaste acelerado do rebolo, devem ser aplicados fluidos de corte.

F. W. Taylor foi um dos primeiros a provar o grande auxílio que os líquidos podem trazer no corte de metais. Em 1883, ele demonstrou que um jato de água aspergido na ferramenta, no cavaco e na superfície da peça, tornava possível o aumento da velocidade de corte de 30% a 40%. Foi essa constatação feita por Taylor e por outros pesquisadores, que incentivaram o estudo e o desenvolvimento de vários tipos de fluidos de corte ao longo dos anos e, principalmente nas últimas décadas (Silliman, 1992; Machado & Diniz, 2000).

O fluido de corte tem basicamente as seguintes funções (König, 1980):

- Redução do atrito entre grão abrasivo e peça, bem como do atrito entre ligante e peça, pela formação de um filme de lubrificante estável;
- Refrigeração da superfície da peça, pela absorção e posterior transporte de calor;

- Limpeza do rebolo, através da remoção de cavacos e de resíduos dos poros do rebolo, sem a qual o rebolo pode perder sua capacidade de corte e causar um aumento na temperatura.

A Figura 2.18 (Dörr & Sahm apud Catai, 2004) mostra o consumo de lubrificante/refrigerante na Alemanha no ano de 1997, pode-se verificar que o consumo de fluido de corte foi de 7% de um total de 798.619 toneladas, o que significa um consumo de 55.883 toneladas/ano de fluido de corte.

Consumo de lubrificantes comparado ao consumo de outros óleos

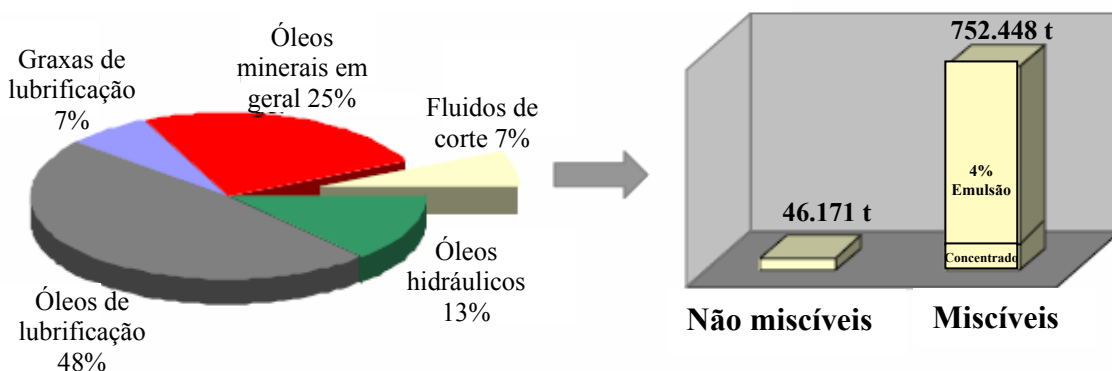


Figura 2.18 – Quantidade de lubrificantes utilizados em 1997 na Alemanha (Novaski & Dörr apud Catai, 2004).

Segundo Young et al. e Novaski & Dörr apud Catai (2004), na Alemanha em 1997, os custos com fluidos de corte apresentaram, em média, 17% dos custos de manufatura, representando um valor expressivo comparado aos gastos destinados à ferramenta que apresenta, em média, de 2% a 4%, além dos gastos adicionais de manutenção do sistema e separação do cavaco do fluido de corte para uma posterior refundição. A Figura 2.19 apresenta a porcentagem dos custos com fluidos inseridos no custo de fabricação, mostrando claramente a necessidade de se minimizar a quantidade de fluido de corte utilizada nos processos, a fim de se reduzir os custos.

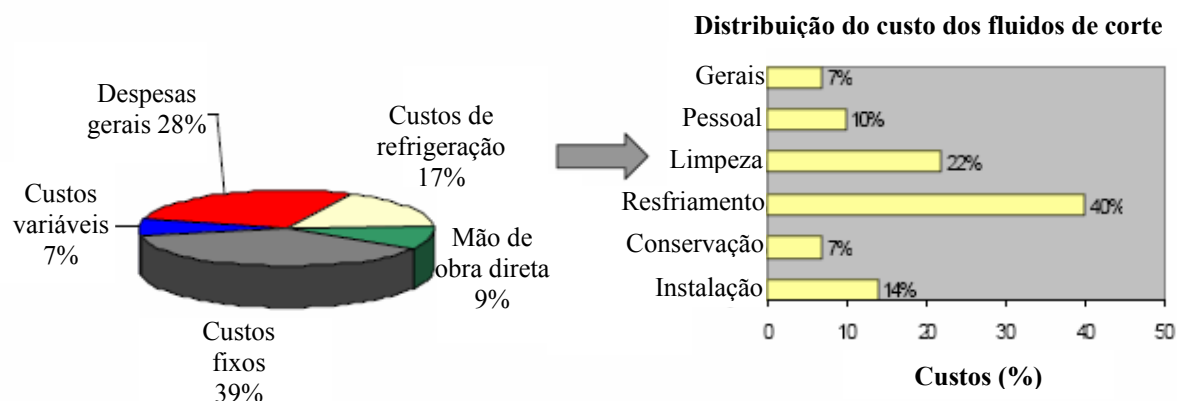


Figura 2.19 – Porcentagem dos custos com fluidos de corte inserida ns custos de fabricação das peças (Novaski & Dörr apud Catai, 2004).

2.6.2 Propriedades e características do fluido de corte para retificação

A Tabela 2.3 mostra as principais características dos fluidos de corte para retificação.

Tabela 2.3 – Características dos fluidos de corte (1 = pior; 4 = melhor) (Sreejith & Ngoi, 2000).

	Fluidos sintéticos	Fluidos semi-sintéticos	Emulsões	Óleos de corte
Remoção de calor	4	3	2	1
Lubrificação	1	2	3	4
Manutenção	3	2	1	4
Facilidade de filtração	4	3	2	1
Aspectos ambientais	4	3	2	1
Custo	4	3	2	1
Aumento da vida do rebolo	1	2	3	4

a) Fluidos de corte não miscíveis em água (óleos de corte)

As características principais do processo de retificação em comparação com outros processos de usinagem é a grande área de contato entre ferramenta e peça e o atrito entre o grão abrasivo e a superfície da peça. Para diminuir o atrito e as temperaturas, durante a usinagem, é necessário criar camadas de separação (constituídas de fluido de corte) entre as superfícies sólidas da ferramenta e da peça.

Os fluidos de corte não miscíveis em água, também denominados óleos de corte, são fabricados à base de óleos minerais e vegetais.

Os óleos de corte apresentam uma melhor lubricidade, quando comparados com as emulsões de óleo em água. A viscosidade cinemática do óleo mineral, a uma temperatura de 40°C, é aproximadamente 50 vezes maior que a viscosidade cinemática da água. Essa característica é particularmente importante na retificação dos chamados materiais formadores de cavacos longos como os aços, em que o atrito é o responsável por grande parte do calor gerado (Bertalan, 1997).

Os óleos minerais apresentam boas propriedades anticorrosivas e devido ao refino, praticamente não apresentam contaminação. Não há necessidade de adição de antibióticos para evitar a proliferação de fungos ou de inibidores de corrosão da máquina-ferramenta e da peça. Por outro lado, é necessária a adição de antioxidantes e antiespumantes que prolongam a vida do fluido e diminuem os efeitos danosos da formação de espuma (menor eficiência de bombeamento e de lubrificação), principalmente, quando altas vazões são utilizadas (Bastos, 1999).

Uma desvantagem do óleo mineral em comparação aos fluidos de corte baseados em água, é a capacidade de refrigeração relativamente baixa. Outra desvantagem é que o óleo mineral cria névoa e vapores na atmosfera, apresentando um perigo de detonação e também de contaminação da área de trabalho. Por esses motivos são necessários equipamentos especiais e precauções dobradas para a retificação com óleos. Há que se considerar ainda que a utilização de óleo mineral leva a maiores custos ambientais, principalmente quando há presença de aditivos clorados em sua composição (Bertalan, 1997).

b) Emulsões de óleo em água

Em processos de retificação em que o interesse principal é a estabilização da temperatura, devem ser utilizadas emulsões de óleo em água. A quantidade de óleo determina a capacidade de lubrificação e a quantidade de água determina a capacidade de refrigeração. As concentrações comuns utilizadas na retificação são de 1% a 2% de óleo em água. Contudo, em operações mais difíceis, nas quais se deseja oferecer melhores condições de lubrificação, as emulsões costumam ser usadas em concentrações de 5% a 20% e com aditivo de extrema pressão (Da silva, 1999).

As propriedades físicas da emulsão são comparáveis às da água, e têm capacidade térmica específica duas vezes maiores e uma condutividade térmica cerca de cinco vezes maior do que a do óleo (König, 1980).

Através da ação de substância emulsionante, obtém-se uma fina distribuição de gotículas de óleo em água. O tamanho das gotículas de óleo é regulado pela escolha do emulsionante.

Emulsões grosseiras são leitosas. Com a diminuição do tamanho da gotícula aumenta a transparência da emulsão. A emulsão finamente dispersa é transparente e mesmo com o fluido de corte ligado, o processo de usinagem na região de trabalho pode ser observado, o que pode ser particularmente importante em operações de retificação em ferramentaria (Da Silva, 1999).

As vantagens das emulsões de óleo em água, quando comparadas com o óleo mineral, são o menor custo e maior capacidade de limpeza do rebolo. As principais desvantagens são as perdas de óleo, devido a sua aderência aos cavacos e às peças acabadas, o que reduz gradativamente a concentração da emulsão, sendo necessário controlar e adicionar óleo periodicamente para manter a efetividade da emulsão (Taborga, 2002), e a possibilidade de contaminação por microorganismos, que devem ser combatidos por bactericidas e fungicidas, o que eleva o custo de manutenção (Silva et al, 1995).

c) Soluções aquosas (fluidos sintéticos)

Soluções aquosas, também chamadas de fluidos sintéticos, são obtidas pela mistura de um concentrado de produtos orgânicos ou inorgânicos, em concentrações de 1% a 2% com água.

A ação de soluções, que em geral são isentas de óleos minerais, está baseada não no efeito de lubrificação, mas apenas em um efeito de refrigeração e limpeza. As vantagens dessas soluções são a boa estabilidade e a boa transparência, que geralmente são mantidas durante longo período de utilização, já que não contêm substâncias que reagem com os cavacos (Silva et al, 1995).

Um novo conceito de fluido de corte proposto ao mercado refere-se a um tipo não-combustível, no qual a água, o glicol e a base polimérica (poliéster feito por adição randômica de óxido etilênico e óxido propilênico, interno a um álcool polivalente) formam o maior volume de componentes, no qual o óleo mineral é totalmente excluído. Os resultados dos testes de corte em que tais fluidos foram comparados com os insolúveis comerciais mostraram melhoria significativa da lubrificação e da prevenção na formação de névoa (Ramos et al, 2003).

d) Gases

A utilização de gases inertes como refrigerantes trazem como benefício o aumento do poder refrigerante na região de corte, possibilidade de uma visão clara da região de corte, ausência de contaminação da peça e dos cavacos. Contudo, pesquisas vêm sendo realizadas visando adequar à possibilidade da real utilização desses gases em larga escala, segundo requisitos de qualidade e produtividade para as peças usinadas. O uso de gases como o CO₂, que possuem ponto de ebulição abaixo da temperatura ambiente também pode ser comprimido e injetados na região de corte promovendo sua refrigeração. Porém, gradientes térmicos devem ser evitados, impedindo distorções das peças e surgimento de tensões residuais (Silliman, 1992; El Baradie, 1996; Silva, 2000).

d) Pastas e lubrificantes sólidos

Existem pastas e lubrificantes sólidos que são aplicados manualmente sobre a peça e na ferramenta em operações de mandrilamento. Rebolos, em alguns casos, são impregnados com lubrificantes sólidos, durante o processo de fabricação. Os lubrificantes sólidos mais utilizados para operações de elevada severidade são a grafite, o bissulfeto de molibdênio, alguns tipos de pastas, sabões e ceras (Silva, 2000).

2.6.3 Aditivação do fluido de corte

O fluido de corte aditivado é utilizado para agregar benefícios específicos ao fluido de corte base. Cada aditivo tem o objetivo de melhorar uma propriedade específica do fluido de corte.

Para melhorar a lubrificação são utilizados, principalmente, aditivos polares e aditivos de extrema pressão. No grupo de aditivos polares, de sobremodo são encontrados aditivos minerais e vegetais. As moléculas de ácidos graxos depositam-se firmemente sobre a superfície metálica, formando várias camadas de fácil cisalhamento e de boa resistência à compressão. A faixa de temperaturas na quais esses materiais polares atuam é relativamente baixa, sendo de no máximo 130°C. Eles são apropriados para processos de acabamento, para a obtenção de boas qualidades superficiais e para a retificação de materiais leves e metais amarelos.

Para solicitações maiores, por exemplo, para material de difícil usinabilidade, são utilizados os aditivos de extrema pressão na forma de fósforo, cloro e combinações de enxofre. Os filmes lubrificantes são relativamente duros e resistentes ao desgaste, resultam da reação dos aditivos de extrema pressão com a superfície metálica e resistem a temperaturas de 800°C, portanto, encontram aplicação em operações pesadas (König, 1980).

2.6.4 Quantidade mínima de fluido de corte na retificação

Na retificação de eixo de comando de válvulas, os fluidos de corte representam um percentual relativamente alto do custo da peça, próximo a 16,9 % do custo devido ao suprimento de fluido de corte (eletricidade, limpeza, fluido de corte, equipamentos de laboratório, etc.). Desses 16,9%, o custo de eliminação do fluido de corte representa 54% (Brinksmeier et al, 2000). Uma alternativa para a redução do uso de fluido de corte é a utilização da quantidade mínima de lubrificação (MQFC), vazões muito pequenas, em torno de 0,5 ml/min, o que corresponde a uma vazão 2.000 vezes menor à usada por inundação (10 l/min). Além disso, é utilizado o éster, o qual é classificado como substância não cancerígena e não perigosa.

Segundo as experimentações de Brinksmeier et al, 2000, (Fig. 2.20), o MQFC só poderá ser utilizado nos processos de acabamento, sendo que, para taxas de retificação maiores que um mm³/mm.s ocorrem danos térmicos à peça. Usando MQFC na retificação de um aço cementado e temperado (SAE 5115) as forças são maiores e o acabamento é pior.

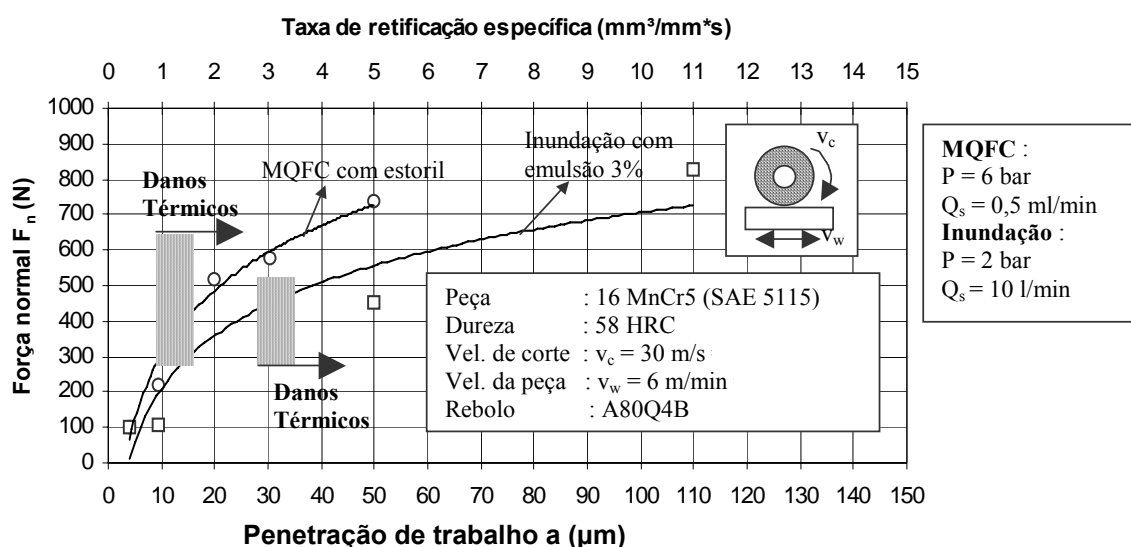


Figura 2.20 - Força normal em função de penetração de trabalho utilizando MQFC e emulsão por inundação (Brinksmeier et al, 2000).

Hafenbraedl & Malkin, 2000, fez experimentações utilizando MQFC na retificação interna e encontrou resultados aceitáveis, citando como desvantagem principal a perda de exatidão devido à dilatação térmica pela falta de refrigeração. A principal vantagem é a redução do uso do fluido de corte, sendo que nesse experimento o pesquisador utilizou uma vazão 26.500 vezes menor que as usadas por inundação (50 l/min).

2.6.5 Refrigeração na retificação com CBN

A forma da aplicação do fluido de corte nos processos de retificação cresce de importância, à medida que se desejam maiores taxas de remoção de material, qualidade superior e vida mais longa do rebolo. A seleção da forma de aplicação mais eficiente e o cumprimento dos procedimentos padrão de manutenção do fluido são extremamente importantes para o aumento da produtividade. São tão importantes quanto à correta especificação do rebolo.

A seleção do tipo mais adequado de fluido de corte e a forma mais eficaz de aplicação no processo estão sendo intensamente estudados para utilização na retificação com rebolos de CBN em aplicações à alta velocidade (Hitchiner, 1999). Sistemas baseados na utilização de óleo integral como fluido de corte necessitam de, no mínimo, duas vezes mais capacidade de filtração e de resfriamento do que os sistemas que utilizam fluidos de base aquosa (Webster apud Oliveira, 2003).

A retificação com superabrasivos requer um uso eficaz do fluido de corte, uma vez que as condições de usinagem apresentam características bem peculiares se comparadas àquelas encontradas na usinagem com abrasivos convencionais. Essas características, altas taxas de remoção e velocidade de corte, exigem uma limpeza eficiente dos poros do rebolo, o que significa um aumento na pressão e velocidade de saída do fluido na tubeira. Por outro lado, é igualmente indispensável a eficiente remoção do calor da região de corte.

Entre os processos citados acima se encontram o *Creep-Feed* e o *High Efficiency Deep Grinding* (Tawakoli, 1990), em que o arco de contato entre o grão abrasivo e o material da peça é longo, ocorrendo elevado aporte térmico sobre a peça, além da grande quantidade de cavacos produzidos.

O crescente uso das emulsões como fluido de corte em substituição aos fluidos integrais, reduz os problemas com descarte ao ambiente, mas necessita de soluções para alguns inconvenientes, como: a baixa viscosidade da água, por exemplo, torna a sua aplicação a altas velocidades susceptíveis ao efeito da dispersão do jato do fluido. Esse problema pode

ser contornado pela colocação da tubeira em uma posição mais próxima à região de corte, o que pode ainda ser dificultado pela geometria da peça ou mesmo pelo sistema de fixação. Tais fatores podem inviabilizar a opção pelo deslocamento da tubeira e exigir um aumento da vazão para compensar a dispersão do fluido (volume maior de fluido é usado que o necessário) ou mesmo o uso de equipamentos de bombeamento mais robustos (Imai et al, 1995). A quantidade de calor retirado do processo pode gerar a necessidade de equipamentos adicionais de refrigeração para o fluido de corte, assim como reservatórios maiores.

O problema da barreira aerodinâmica formada sobre a superfície do rebolo devido às altas velocidades empregadas é outro fator que exige atenção, de modo a permitir o acesso do fluido à região de corte de forma eficiente e a custos compatíveis.

A solução proposta por Imai et al 1995 (Fig. 2.21), na qual a tubeira foi posicionada perpendicularmente à superfície do rebolo e a incidência do jato foi deslocada a montante da região de corte, apresentou bons resultados além de menor demanda volumétrica de fluido.

Para resolver tais problemas foram elaboradas novas configurações de tubeiras procurando garantir um regime de escoamento laminar mesmo com elevadas vazões (Yasui et al, 1991). Alguns pesquisadores sugerem a colocação de bocais de alta pressão a 90° e /ou 180° da região de corte (König, 1980).

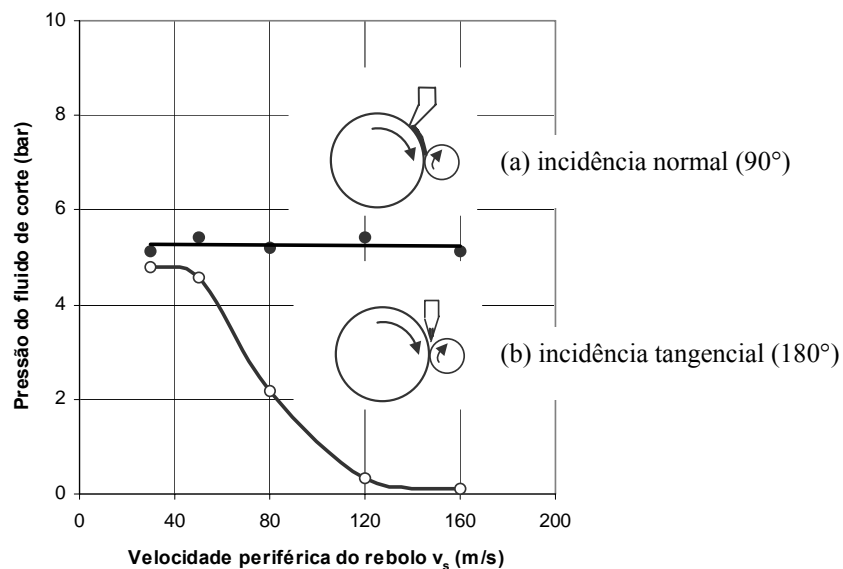


Figura 2.21 - Tubeira única com (a) incidência normal e (b) incidência tangencial (Imai et al, 1995).

A Figura 2.22 mostra o posicionamento das tubeiras perpendicular à superfície do rebolo (90°), essas tubeiras têm a finalidade de romper eficientemente a camada aerodinâmica

formada em torno do rebolo girando em alta velocidade. É possível constatar que quanto mais próximo à região de trabalho estiver posicionado a tubeira mais eficiente é sua atuação. O gráfico mostra que a atuação da tubeira nº. 1 proporciona um acabamento melhor da superfície da peça, quanto comparado à atuação simultânea da tubeira nº. 1 e nº. 2 ou tubeira nº. 1 e nº. 3, por exemplo.

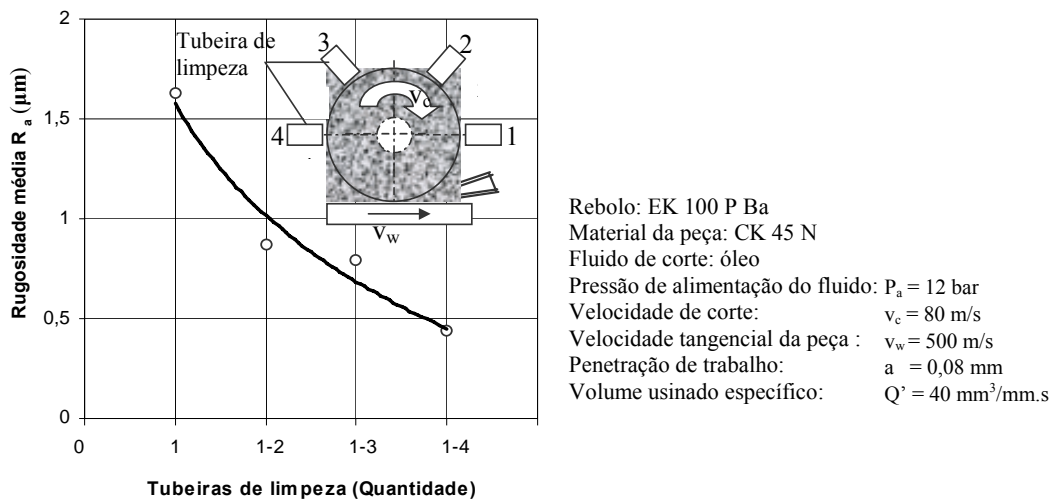


Figura 2.22 - Sistema múltiplo de tubeiras (König, 1980).

Segundo a maioria dos pesquisadores, o óleo mineral, sobretudo o aditivado, é o fluido ideal para retificação com CBN (Tabesh, 1990), devido à afinidade química entre o vapor d'água e a camada protetora de óxido bórico e o maior poder lubrificante do óleo de corte. Para Tönshoff et al, 1985, porém, a típica forma de desgaste devido ao aquecimento do CBN em presença de vapor d'água, que se caracteriza por gerar riscos na superfície do grão, só pode ser observada em laboratório e não em um processo real de retificação.

Como consequência direta da utilização de óleos minerais tem-se, portanto, maiores relações de remoção G (Equação 2.6), menores temperaturas máximas alcançadas pela peça na região de corte e um padrão de tensões residuais, geralmente compressivas. A tabela 2.4 mostra as relações G obtidas com a utilização de diversos fluidos de corte em retificação plana longitudinal.

Entretanto, pressões ambientalistas e trabalhistas cada vez maiores têm sido exercidas em função do descarte de fluidos de corte usados, que causam danos graves ao meio ambiente, e à saúde do operador, muito afetado pela maior tendência que os óleos minerais têm de formar névoa (Howes et al, 1991). Os principais problemas são as dermatites (problemas na pele), problemas respiratórios (lesões nos pulmões), inclusive câncer. Portanto,

deve-se evitar o contato com o fluido de corte. Além disso, fabricantes de fluidos sintéticos passaram a alegar que os novos fluidos sintéticos teriam maior poder lubrificante do que o óleo mineral puro e emulsões para temperaturas acima de 900°C (Rauth & Vahle, 1988).

Tabela 2.4 – Faixa de relação de remoção para diversos fluidos de corte (Tabesh, 1990).

CONDIÇÕES DO TESTE		
MATERIAL RETIFICADO	Aço ferramenta T-15	Aço ferramenta D-2
Velocidade de corte	28 m/s	
Velocidade da peça v_w	15,25 m/min	
Penetração normal a superfície de trabalho a_p	0,050 mm	0,076mm
Penetração na superfície de trabalho a_e	1,27 mm	
Especificação do Rebolo	Rebolo resinóide de CBN 6 x ¼ Granulometria 140/170 Mesh Concentração 100	
RESULTADOS OBTIDOS		
TIPO DE FLUIDO	RELAÇÃO DE REMOÇÃO (G)	
ÓLEO MINERAL PURO	408	554
EMULSÃO A 5%	278	195
EMULSÃO A 2%	204	60
FLUIDO SEMI-SINTÉTICO A 2%	250	152
FLUIDO SINTÉTICO A 2%	197	106

Desse modo, o emprego de fluido sintético para serviços leves (diluídos de 2 a 5% em água) está sendo recomendado por fabricantes para situações em que se tem pequena taxa de retificação de materiais duros. O uso de óleos minerais e fluidos sintéticos para serviços pesados (diluídos de 5 a 10 % em água), é recomendado para altas taxas de retificação e velocidades de corte (Barnard, 1989).

É extremamente difícil prever a vazão de fluido de corte requerida para promover a lubrificação necessária, de forma eficaz, e a remoção do calor por convecção. Fatores como a porosidade do rebolo, pressão da bomba do fluido de corte, propriedades mecânicas e térmicas da peça, lubricidade e molhabilidade do fluido de corte e a taxa de remoção de material influencia na seleção da vazão de fluido de corte a ser empregada. A vazão requerida pode variar ainda de acordo com os tipos de fluido de corte e de rebolo utilizados, material da peça, taxa de remoção de material, tolerâncias dimensionais, propriedades mecânicas e qualidade da superfície a ser obtida no material retificado.

Para processos em que são empregadas altas velocidades de corte, próximas de 100m/s, há indicações de que o sistema de alimentação do fluido de corte tem de ser

especialmente projetado. Para a zona de corte recomenda-se que o fluido seja fornecido a uma pressão de 6 bar, que o bocal da tubeira seja dimensionado de forma que sua largura seja igual à largura do rebolo e que a velocidade de saída do fluido, levando-se em conta a vazão fornecida pela bomba, seja aproximadamente igual à velocidade de corte. Isso se justifica pelo fato de que em altas velocidades periféricas do rebolo forma-se uma barreira de ar que impede a penetração do fluido na região de corte. Além disso, é recomendada ainda a instalação de duas tubeiras em outras posições, as quais devem fornecer fluido a uma pressão de 15 a 20 bar, de modo a assegurar a remoção dos cavacos dos poros do rebolo (Barnard, 1989).

A filtração do fluido de corte é um fator essencial para a obtenção de peças retificadas de qualidade, principalmente se forem utilizados rebolos de CBN. Se o fluido de corte apresentar uma quantidade excessiva de partículas abrasivas e cavacos, o rebolo sofrerá um empastamento prematuro (Leal, 1993). Como resultado, tem-se um aumento do número das operações de dressamento e dos custos de retificação. Com uma filtração ineficiente, ocorrerão problemas nas bombas de sucção, decorrentes do desgaste abrasivo entre as partículas dissolvidas no cavaco e as partes internas das bombas.

2.6.6 Influência do fluido de corte na retificação

Ao se retificar uma peça, pretende-se que uma série de benefícios que agregam valor ao produto esteja sendo realizada. Exemplos desses benefícios são, entre outros: o alívio de tensões localizadas, a correção de desvios dimensionais e de forma, originados em operações anteriores, a correção de deformações originadas em tratamentos térmicos, e a remoção de camadas da superfície que possam estar danificadas ou alteradas, devido a tratamentos como cementação e têmpera da camada externa do componente.

A ocorrência de danos à integridade da superfície de uma peça pode levar à aceleração do processo de fadiga da peça, alterar a resistência à abrasão e à corrosão, ou ainda provocar o surgimento de trincas.

A garantia da integridade da superfície de uma peça retificada depende da capacidade de remoção de calor do sistema lubri-refrigerante. A quantidade de calor removida através do cavaco é pequena, se comparada à quantidade restante, para garantir temperaturas de retificação baixas é necessário remover o calor restante predominantemente pelo fluido lubri-refrigerante. A técnica de lubri-refrigeração mais empregada para realizar tal tarefa é a adução abundante de fluido direcionada diretamente para a região de contato entre o rebolo e a peça (Vieira, 1992).

Por lubri-refrigeração adequada entende-se o volume abundante de fluido, a pressão elevada e o direcionamento do bico de refrigeração, de modo a fazer com que o lubri/refrigerante chegue à região de contato juntamente com o grão abrasivo. Qualquer inadequação pode fazer com que ocorra evaporação do fluido antes de atingir a região de contato (caso de baixa pressão ou de pouco volume) ou que o fluido seja direcionado para a superfície do rebolo e/ou da peça que não estejam na região de contato (Taborga, 2002).

Conforme é mostrado na Figura 2.23, em uma operação na qual é utilizado óleo, para uma mesma taxa de retificação específica, a força normal específica é menor, devido à diminuição do atrito. Isso é explicado pela formação de um filme lubrificante entre o gume-peça, cavaco-face e peça-ligante. Quando é formado o filme lubrificante, há um aumento da deformação elasto-plástica debaixo do gume, resultando em menor rugosidade (König, 1980).

Devido à redução da força total quando é utilizado óleo, a força por gume também será menor, logo, o desgaste por fratura de ligante será menor. O óleo também diminui o atrito entre o cavaco e o ligante, o que diminui a deteriorização do ligante. Outro fator importante é que a redução de atrito entre gume-peça diminui o aumento da área desgastada, causando uma diminuição da força de desgaste.

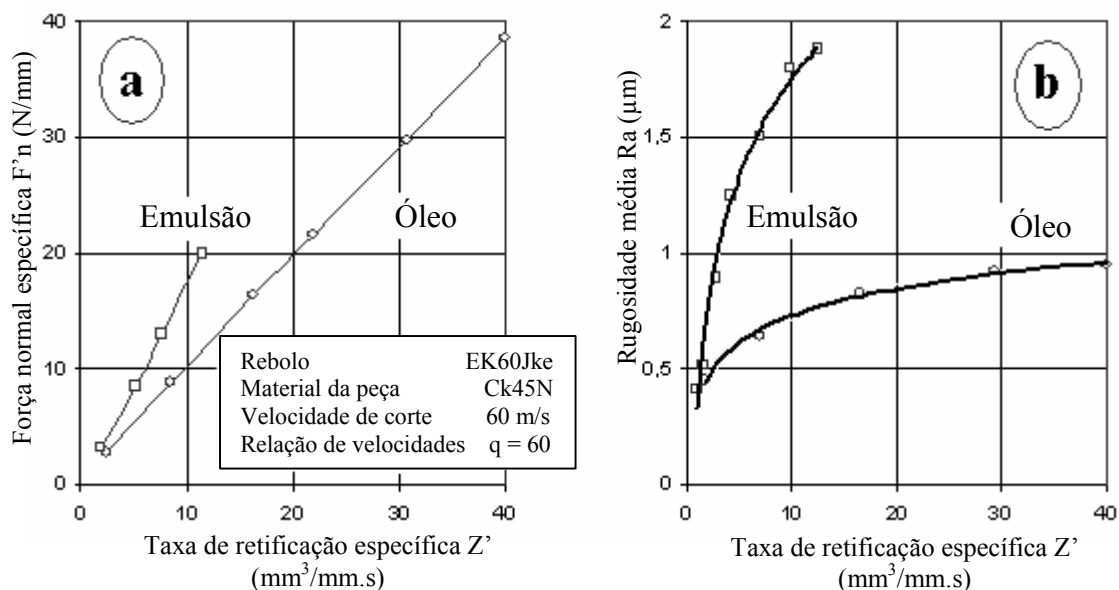


Figura 2.23 - Influência do fluido de corte na força e qualidade da superfície (König, 1980).

Quando é empregado óleo, o aumento da área desgastada é mais lento, sendo necessário remover maior volume para atingir a área crítica (Fig. 2.24). Em resumo, a utilização do óleo diminui o desgaste do rebolo.

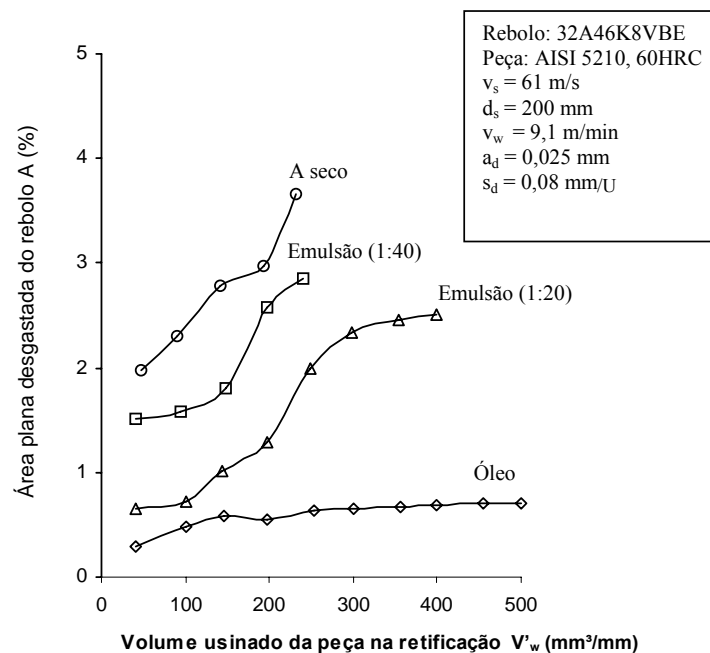


Figura 2.24 - Influência do fluido de corte no aumento da área plana desgastada do rebolo (Taborga, 2002).

No entanto, lubrificação em excesso pode ter um efeito negativo na eficiência do processo. Como na retificação, a maior parcela do calor é devido ao atrito, o uso de lubrificante baixa a temperatura máxima da peça e é preciso maior energia para a deformação e cisalhamento (König, 1980). Outra função do refrigerante é diminuir a temperatura da peça, o que é alcançado pelo transporte de calor da peça e do rebolo ao fluido de corte por convecção. A idéia principal na aplicação de fluidos de corte é a redução de temperatura para assim garantir a integridade da superfície da peça, além de diminuir a força, o desgaste e melhorar o acabamento.

Não somente o tipo de fluido correto é importante para se obter um bom desempenho na retificação, no processo deve ser garantido que o fluido de corte ingresse na zona de contato, o que ocorre quando o fluido consegue vencer a barreira de ar que se forma na periferia do rebolo.

Devido ao alto custo e ao perigo, nem sempre são utilizadas altas pressões para vencer a barreira de ar. Um método simples para diminuí-las é desviar o ar, o que pode ser feito com a utilização de um raspador (*scraper*) (Fig. 2.25). Outra forma é a utilização de dois bocais, um para o fluido de corte e outro para o desvio do ar, que são colocados perpendiculares ao rebolo, com a função principal de desviar ou romper a barreira de ar.

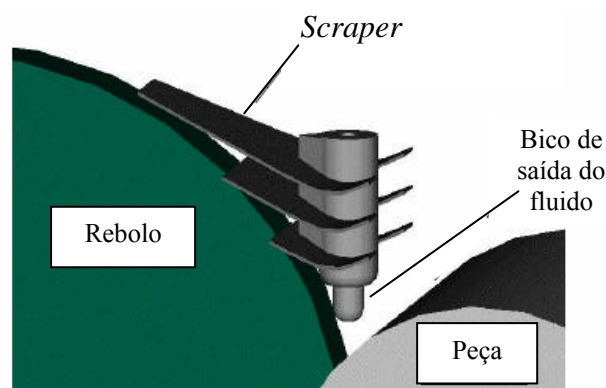


Figura 2.25 – Ilustração de um sistema de defletores (Bianchi et al., 2002).

2.6.7 Estratégia para aplicação de fluido de corte no processo de retificação

Para o suprimento do fluido de corte são utilizados diferentes tipos de bocais, que dependem da aplicação, sendo os principais bocais mostrados na Figura 2.26. Os tipos de bocais mais utilizados na indústria são o bocal de jato livre e o bocal em forma de sapata assentada no reboło (*shoe*), ambos pertencentes ao grupo de bocais de inundação. A vazão do fluido de corte é elevada e a pressão é relativamente baixa. O bocal *shoe* é utilizado principalmente na retificação profunda.

Uma forma especial do bocal de jato livre é o bocal de jato concentrado. Nesse tipo de bocal a seção de saída do bocal é pequena. Para uma mesma vazão o jato terá maior velocidade, exigindo pressões maiores. O jato pode atingir velocidades de até 365 m/s e pressões máximas no bocal de 3.800 bar, em um equipamento de corte por jato d'água, adaptado para o suprimento do fluido de corte na retificação. Para rebolos com porosidade baixa, como por exemplo, os rebolos de CBN com revestimento galvânico, o fluido é alimentado através de furos radiais no reboło (Brinksmeier et al, 1999).

Quanto maior for a vazão de aplicação do fluido, maior será a quantidade de fluido aproveitada na zona de corte. Quanto maior for a quantidade de fluido que ingressa na zona de contato, melhor será a lubrificação e/ou refrigeração. Mas apenas aproximadamente de 4% a 30% do fluido de corte passam através da zona de contato, quando usado os bocais de inundação convencionais (Engineer et al, 1992).

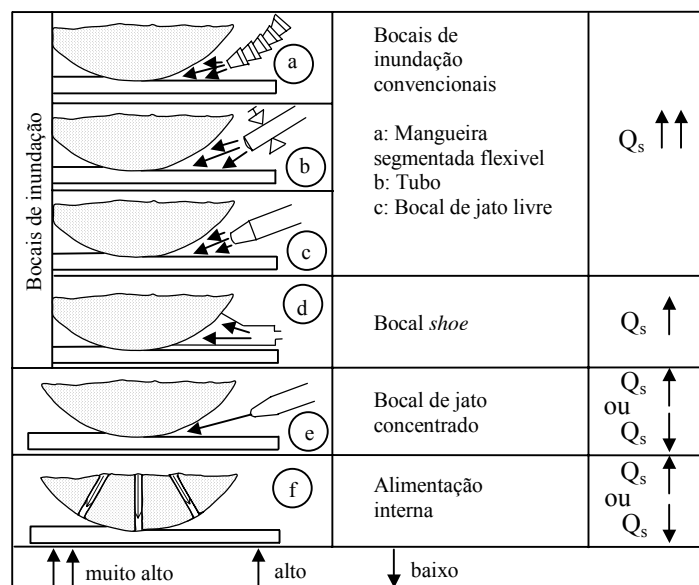


Figura 2.26 - Estratégias para o suprimento do fluido de corte (Brinksmeier et al, 1999).

A porosidade do rebolo é fator determinante na vazão que atinge a zona de contato rebolo/peça (Fig. 2.27). O percentual de fluido através da zona de corte é maior com rebolos utilizados na retificação profunda (F25, F16, I25), aproximadamente de 12 até 18% do fluido ministrado passa através da zona de contato. Para rebolos utilizados na retificação pendular (I8, K8, K5) aproximadamente de 4 a 8% do fluido ministrado passa pela zona de corte (Engineer et al, 1992).

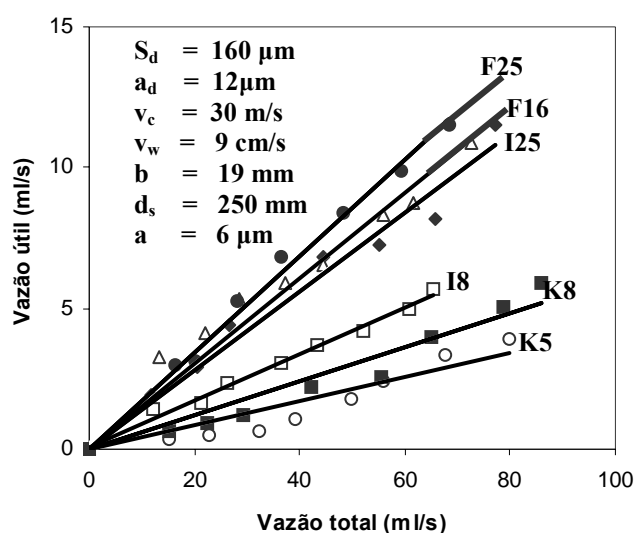


Figura 2.27 – Influência da porosidade do rebolo na vazão na zona de corte (Engineer et al, 1992).

Outro fator influente na vazão útil é a posição do bocal. A vazão útil é a quantidade de fluido que atua na refrigeração e lubrificação, atingindo a região de contato rebolo/peça. Quanto mais perto o bocal estiver do rebolo, mais fluido passará na zona de corte (Fig. 2.28).

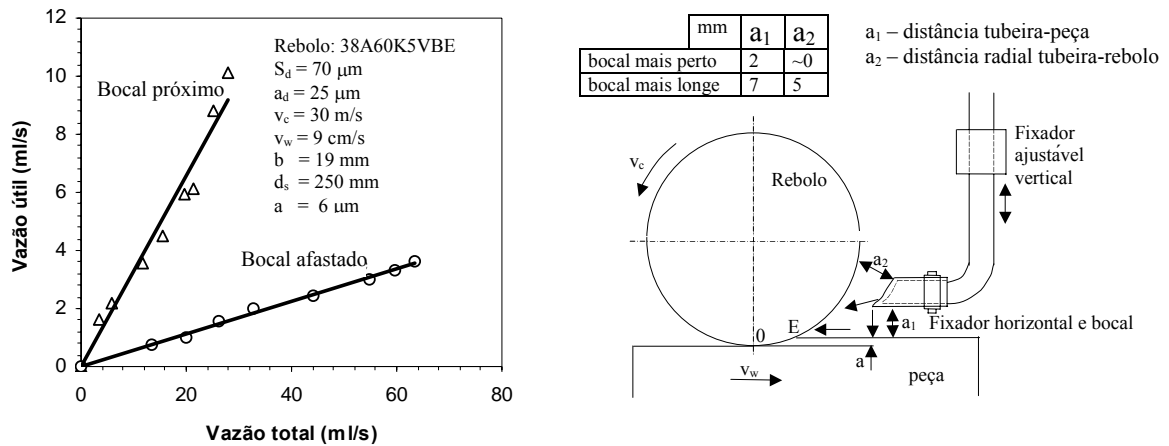


Figura 2.28 - Influência da posição do bocal na vazão útil (Engineer et al, 1992).

O dressamento tem uma influência, mas essa é pequena comparada com as influências já descritas. A profundidade de corte e a velocidade da peça, praticamente, não têm influência na quantidade de fluido que passa pela zona de contato (Guo & Malkin, 1992).

O sistema de aplicação de fluido de corte torna-se crítico à medida que velocidades maiores de corte são empregadas. Novos bicos de aplicação de fluido, maiores velocidades e vazões adequadas são fundamentais para o desempenho satisfatório dos fluidos de corte (Webster, 1999).

A velocidade de saída do fluido de corte é proporcional ao quadrado da pressão na entrada do bocal (Equação 2.7). Em outras palavras, quatro vezes mais pressão é requerida para dobrar a velocidade de saída do jato. Bernolli & Streeter, 1985, define que a pressão de entrada é determinada por:

$$P = 0.5 \cdot \rho_f \cdot v_{sj}^2 \quad (2.7)$$

Onde:

P = pressão de entrada do bocal;

ρ_f = densidade do fluido;

v_{sj} = velocidade de saída do jato de fluido de corte.

Na retificação, a alta velocidade (de 100 a 200m/s), uma grande quantidade de fluido é requerida para igualar a velocidade do fluido à velocidade periférica do rebolo.

Os valores de pressão requeridos podem facilmente exceder 40 bar (Webster, 1999), levando as limitações técnicas e financeiras para a instalação de bombas com elevada pressão e vazão, pois aumentam os custos envolvidos e os esforços requeridos em filtração e resfriamento do fluido.

A forma de aplicação de fluido de corte que não utiliza o rebolo para bombeamento do fluido, gerará altas temperaturas na região de contato rebolo/peça, a ponto de causar têmpera na superfície da peça logo após o contato com o rebolo (Webster, 1999).

A Figura 2.29, apresenta um bico tradicional, o qual, por ter uma ou duas paredes convexas, causa a separação do fluxo do fluido de saída. Esse bocal é extremamente turbulento e utilizado para baixas pressões de aplicação do fluido na região de corte, o que dificulta a coerência do jato (Webster, 1995).

A utilização de bicos convencionais para a saída do fluido não é adequada devido ao crescimento na utilização de fluidos a base de água (com reduzida densidade) que sofrem grande dispersão e se perdem na região de corte, devido à barreira de ar gerada em torno do rebolo, pela sua elevada rotação. Essa barreira de ar pode ser vencida igualando-se a velocidade de saída do jato à velocidade periférica do rebolo. Porém, devido ao desenho ultrapassado de alguns bicos convencionais, o aumento da pressão da bomba, visando aumentar a velocidade de saída do fluido conduz a um aumento da dispersão do jato, diminuindo a eficiência do mesmo. Para se aproveitar o aumento da pressão da bomba sem prejudicar a coerência do jato de fluido de corte, bocais com formatos otimizados podem ser utilizados (Webster, 1999).

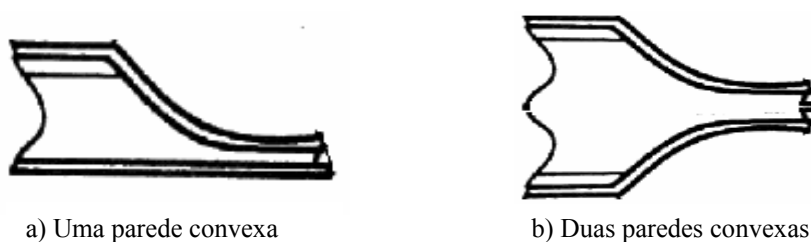


Figura 2.29 – Bico tradicional (Webster, 1995).

Segundo Webster, 1995, um bico otimizado para retificar pequenas larguras de retificação tem o formato circular com paredes internas côncavas, as quais garantem um jato laminar, Figura 2.30. Este bocal, em decorrência da diminuição gradual do diâmetro interno,

minimiza a ocorrência de quedas de pressão localizadas e turbulências no escoamento de fluido de corte.

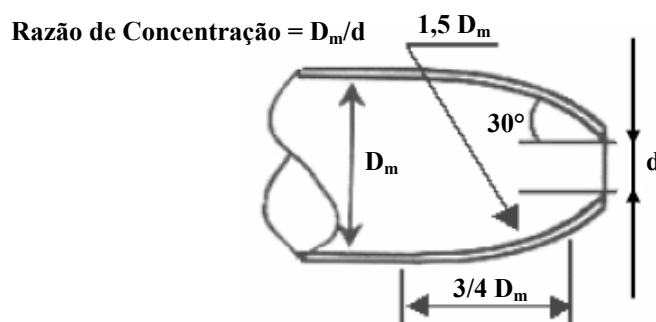


Figura 2.30 – Bico arredondado (Webster, 1995).

Reduzindo-se ou eliminando-se o efeito da camada de ar, quando se trabalha com retificações de altas velocidades de corte, as forças de corte são reduzidas em torno de 40% a 60% e os valores da rugosidade em torno de 10% a 20% (Ramesh et al., 2001).

Na tentativa de fazer com que a direção dos fluidos seja influenciada pelos bicos, o IWT – Institut Für Werkstofftechnik (Instituto de Técnicas de Materiais da cidade de Bremen, na Alemanha) desenvolveu bicos ejetores com elementos condutores (Fig. 2.31).

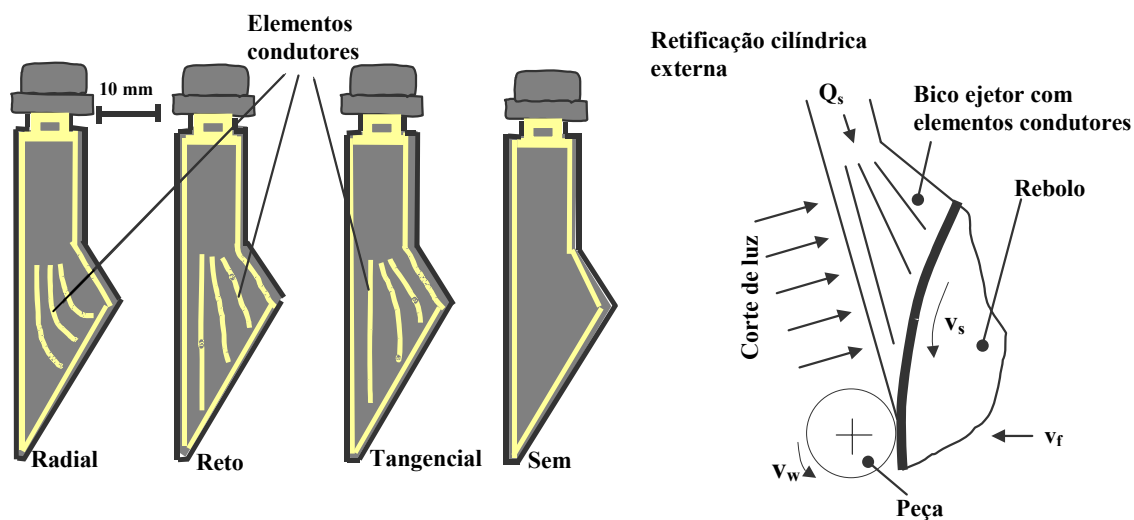


Figura 2.31 - Geometria dos bicos ejetores do tipo sapata (Brinksmeier et al, 2001).

Esses elementos condutores internos servem para melhorar o escoamento dentro dos bicos e para melhorar o preenchimento do volume de poros do rebolo. Uma geometria inadequada de um bico ejetor do tipo sapata leva as condições desfavoráveis de escoamento, como refluxos, separações do fluido, formação de espuma e turbulências, bem como influência negativamente a ação lubri-refrigerante na retificação (Brinksmeier et al, 2001). O

bico ejetor com elementos condutores analisados por Brinksmeier, os com aletas tangenciais apresenta os melhores resultados de escoamento, sem turbulências ou separações (Wittmann et al, 2000).

A Figura 2.32 ilustra um exemplo de escoamento turbulento no bico devido à ausência de elementos condutores, para uma vazão de 20 l/min e uma velocidade de corte de 30 m/s.

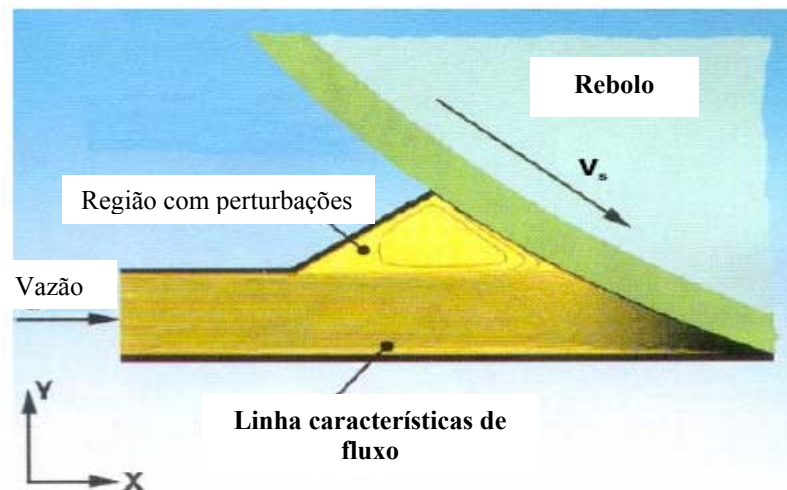


Figura 2.32 – Linhas de escoamento em uma lésbica sem condutores para uma vazão de 20 l/min e velocidade de corte de 30 m/s (Brinksmeier et al, 2001).

A ocorrência de tensões residuais, próprias das peças retificadas, mostra que um bom escoamento não é a única característica para determinar a qualidade do bico ejetor, Fig. 2.33 (Brinksmeier et al, 2001).

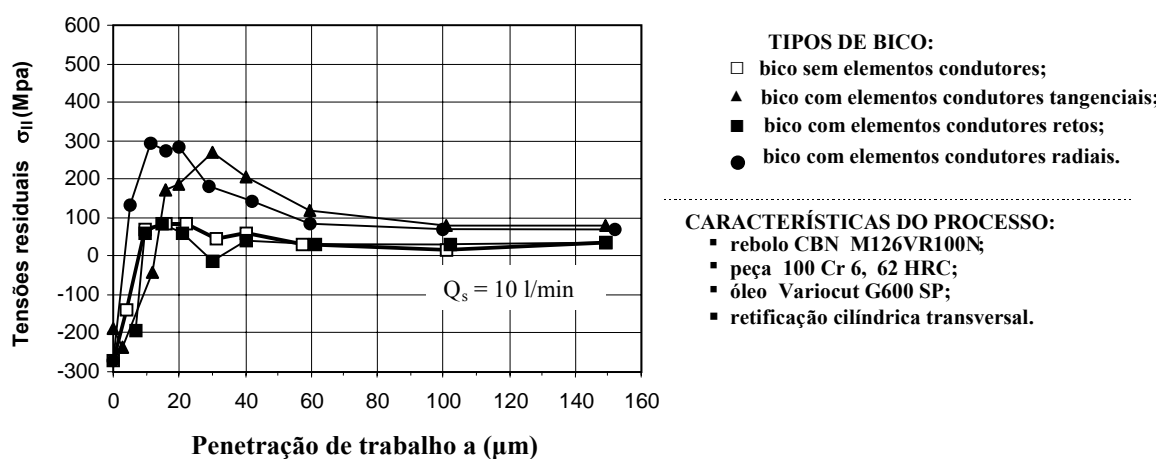


Figura 2.33 - Tensões residuais geradas na peça em função da penetração de trabalho para diferentes bicos ejetores (Brinksmeier et al, 2001).

Para pequenas penetrações de trabalho as tensões residuais são compressivas (retêmpera). Aumentando-se a penetração de trabalho, em decorrência do aumento do revenimento da martensita do material, aumenta a intensidade das tensões residuais de tração na superfície. O bico ejedor com elementos condutores radiais apresenta uma diferença maior de tensão residual com o aumento da penetração de trabalho. Para penetração de trabalho de aproximadamente 10 μ m a tensão residual trativa é de 300 Mpa. Para atingir valor semelhante no bico ejedor com elementos condutores tangenciais a penetração de trabalho necessária é de aproximadamente 30 μ m. O bico ejedor sem elementos condutores e com condutores retos alcança tensão residual trativa de 100 Mpa para uma penetração de trabalho de aproximadamente 10 μ m.

Em função destes resultados conclui-se que embora os bicos ejedores com elementos condutores tangenciais, para uma vazão (Q) de 10 l/min apresentem o melhor comportamento do escoamento, os resultados para estes bicos em testes de retificação apresentaram tensões residuais desfavoráveis. O bico ejedor com elementos condutores radiais apresentou valores de tensão residual semelhantes às obtidas com bicos ejedores com condutores tangenciais. Os valores de tensões residuais obtidos nos ensaios com o bico sem elementos condutores e com elementos retos correspondem aos valores obtidos no tratamento térmico.

Weingärtner, 2005, empregou um sistema de adução de fluido de corte com jato livre e com tubeira tipo sapata sem elementos condutores. O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a influência do sistema de alimentação de fluido de corte sobre o desgaste do rebolo.

O desgaste verificado no rebolo para a tubeira tipo sapata e pressão de 9,7 bar foi aproximadamente 60% menor que o desgaste verificado para a adução de fluido de corte com jato livre. Já com uma pressão de alimentação da sapata de 1,1 bar se verifica um aumento da vida do rebolo em quase 30%, Fig. 2.34 (Weingärtner, 2005).

Além do aumento da vida do rebolo o emprego da sapata tem uma forte influência sobre a quantidade de ar presente abaixo da região de corte. A Figura 2.35 mostra a retificação de uma peça com taxa de retificação – $Z'_w = 10 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$, empregando um sistema de adução de fluido de corte com jato livre, com uma pressão de alimentação do fluido neste ensaio é de 0,1 bar, vazão 50 l/min, mostrando uma grande quantidade de faíscas abaixo da região de trabalho.

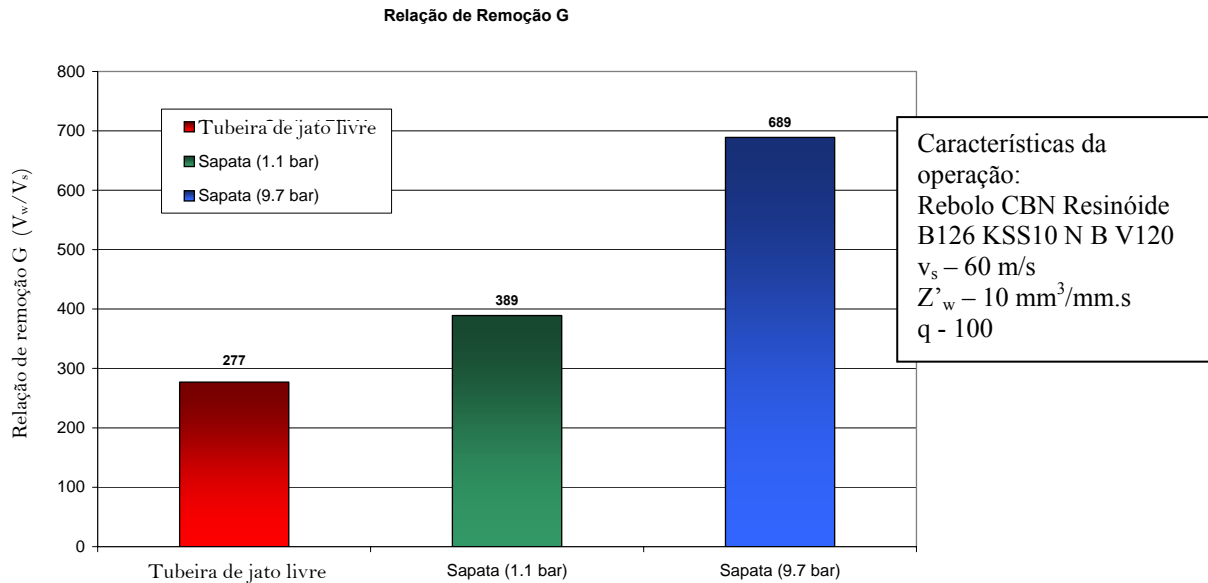


Figura 2.34 - Resultado comparativo para diferentes concepções de sistema de alimentação usando rebolo com ligante resinóide (Weingärtner, 2005).



Figura 2.35 – Alimentação de fluido de corte com jato livre com pressão 0,1 bar (Weingärtner, 2005).

A Figura 2.36 ilustra a retificação de uma peça com a mesma taxa de retificação empregando uma tubeira tipo “sapata” com pressão de 1,1 bar, vazão de 15 l/min. Não se observa faíscas abaixo da região de trabalho, indicando uma boa refrigeração e/ou a ausência de ar necessário para a oxidação do cavaco.

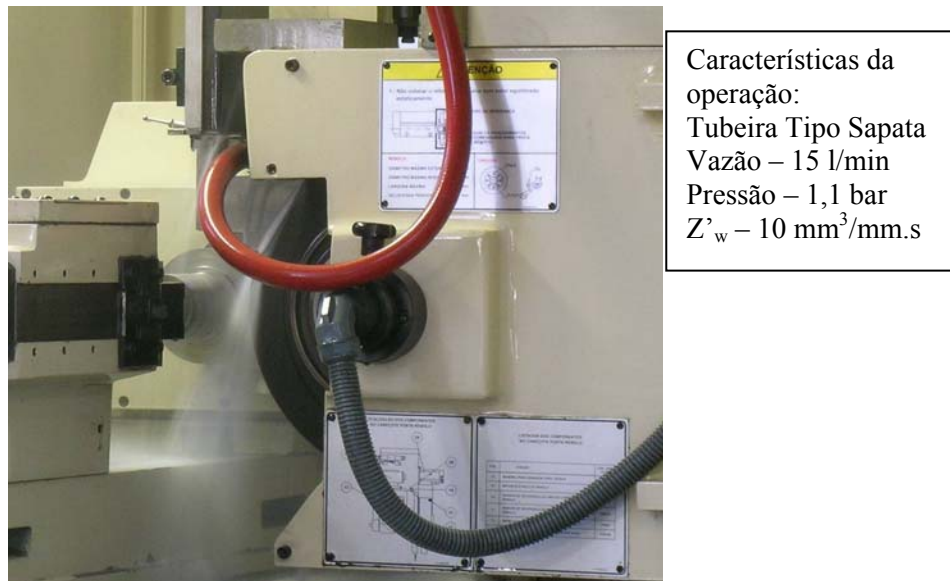


Figura 2.36 – Alimentação de fluido com tubeira do tipo sapata (pressão de 1,1 bar)
 (Weingärtner, 2005).

A Figura 2.37 mostra o aumento da relação de remoção G na retificação com rebolos CBN de ligante vitrificado como função do sistema de adução de fluido de corte empregado (Weingärtner, 2005).

Para rebolos de CBN vitrificado para uma velocidade de corte de 100 m/s a redução de desgaste do rebolo foi ainda mais expressiva Figura 2.37.

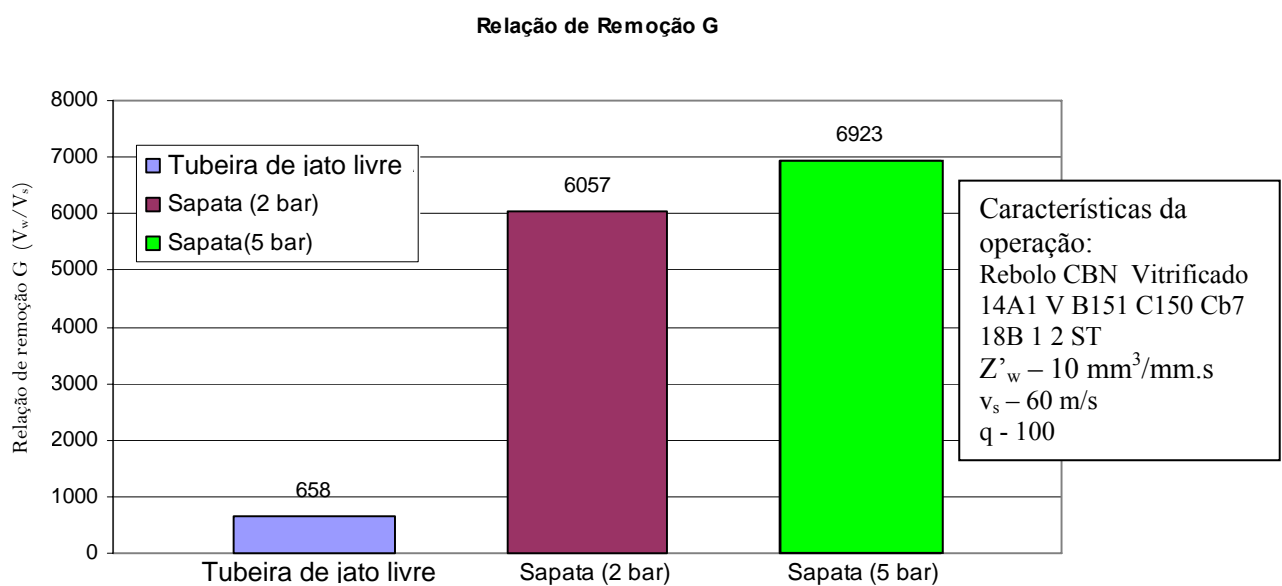


Figura 2.37 – Relação de remoção G como função do sistema de lubri-refrigeração na retificação com rebolo de CBN com ligante vitrificado (Weingärtner, 2005).

O rebolo de ligante vitrificado possui uma estrutura mais aberta e é possível transportar uma quantidade maior de fluido para a região de corte, reduzindo o atrito e o calor gerados no processo (Weingärtner, 2005).

O emprego de sapatas permite um aumento significativo da relação de desgaste, incentivando vários centros de pesquisa a estudarem o efeito destas sobre o resultado na retificação. Beck apud Weingärtner, 2005, sugere uma série de questões, apresentadas na Figura 2.38, as quais são relacionadas, principalmente, com o posicionamento e a geometria da sapata.

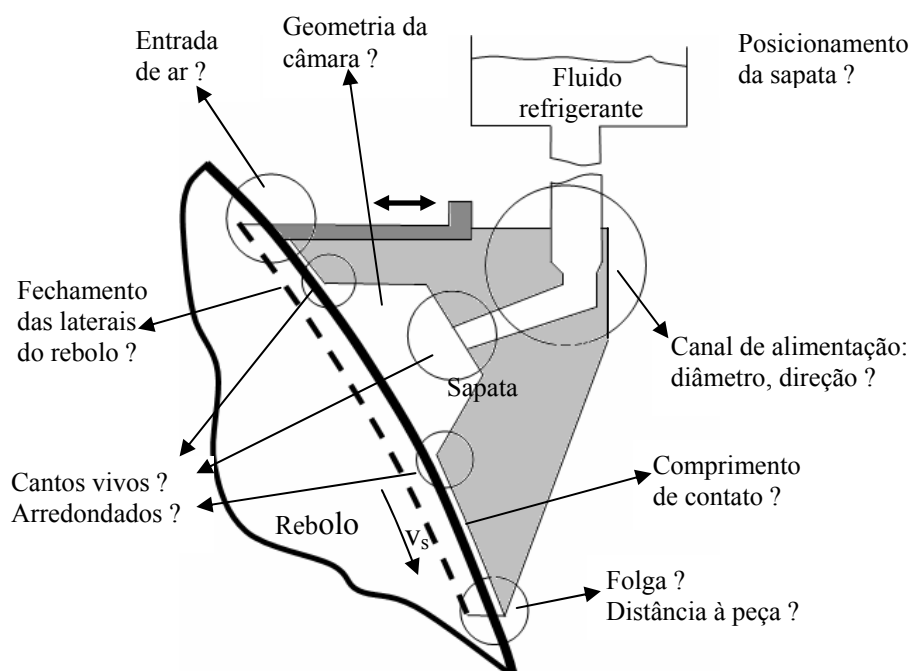


Figura 2.38 – Fatores relacionados à geometria da sapata (Beck, 2002).

2.7 Desafios a serem superados no aprimoramento do sistema de refrigeração

O levantamento realizado nesse trabalho constatou uma variedade grande de dispositivos usados no suprimento de fluido de corte a região de trabalho. A confirmação de que boa parte deles foi lançada nos últimos 10 anos indica a busca crescente por dispositivos que congreguem confiabilidade na refrigeração com custo atrativo e eficiência operacional. Avanços significativos ocorreram, mas esses dispositivos não conseguem atender plenamente aos objetivos para os quais foram desenvolvidos, e o desafio tecnológico de produzir um dispositivo com as qualidades necessárias a refrigeração exigida no processo de retificação

em alta velocidade, permanece. Em muitas situações é necessária a aplicação de vários dispositivos de refrigeração em uma mesma operação para obtenção do resultado desejado.

O uso de um dispositivo de adução de fluido de corte do tipo sapata que seja eficiente e de fácil instalação e que pudesse ser aplicado sem a necessidade de ajustes frequentes, realizados pelo operador da máquina ou pela própria máquina CNC. O conhecimento dos parâmetros de posicionamento do dispositivo de adução tipo sapata mais adequado a sua utilização com menor consumo de fluido teria que atender as seguintes exigências:

- Baixo consumo de rebolo, a diminuição do desgaste radial do rebolo leva ao aumento do número de peças produzidas entre perfilamentos consecutivos e reduz, dessa forma, os tempos secundários;
- Diminuição da quantidade de fluido utilizada na refrigeração pelo melhor aproveitamento do fluido utilizado, fazendo com que maior quantidade de fluido passe pela região de corte;
- Maior flexibilidade no ajuste da folga de trabalho, o processo de refrigeração otimizado permite uma faixa de utilização maior da distância entre a tubeira e o rebolo.
- Possibilidade de fabricar o dispositivo de refrigeração em matérias de custo baixo, como o plástico, que pode ser injetado;
- Eliminação do ar arrastado pelo rebolo sem necessidade de dispositivos auxiliares;
- Pressão de alimentação do fluido baixa o que possibilita uma redução nos custos com bombas de alimentação.

E os benefícios consequentes para o usuário:

- Redução dos tempos e dos custos com perfilamento do rebolo;
- Processos mais confiáveis com menos peças refugadas/retrabalhadas;
- Redução dos custos com fluido de corte, menor custo de preparação, manutenção, descarte e filtragem;
- Baixo custo de fabricação e ou aquisição do dispositivo de adução de fluido lubri-refrigerante.

Estas razões motivaram o constante desenvolvimento de dispositivo de adução de fluido lubri-refrigerante para máquinas retificadoras. A demanda por peças com qualidade cada vez melhor impulsiona e, ao mesmo tempo, é impulsionada pelo constante desenvolvimento dos processos envolvidos na fabricação.

CAPÍTULO 3

PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO EXPERIMENTAL

Para avaliar a influência de tubeiras sobre o escoamento do fluido em operações de retificação são projetadas e fabricadas quatro tubeiras, baseados em geometrias desenvolvidas por Brinksmeier. O dimensionamento e a fabricação das tubeiras é parte integrante da tese e estão detalhados neste capítulo.

O fluido lubri-refrigerante é acelerado pelo rebolo até a velocidade periférica do mesmo. Para avaliar a energia consumida no eixo do rebolo é necessário determinar a potência consumida pelo rebolo para impulsionar o fluido da região em que o fluido entra em contato com o rebolo até a saída da tubeira. Para avaliar o comportamento do escoamento do fluido dentro da tubeira para as diversas condições de abertura da fenda e velocidades periféricas do rebolo é necessário construir tubeiras de material transparente. Para determinar condições adequadas para o uso industrial de sapatas são avaliados a influência da topografia do rebolo, a variação da velocidade periférica do rebolo, a abertura da fenda entre rebolo e tubeira e vazão do fluido de corte.

3.1 Tubeiras

As tubeiras empregadas neste trabalho foram desenvolvidas para melhorar o fornecimento de fluido no processo de retificação, especialmente retificação em altas velocidades, onde o fluido cumpre suas funções de forma apropriada se possuir velocidades semelhante à velocidade periférica do rebolo. Para atingir a velocidade do rebolo, o fluido deve ser fornecido a pressões elevadas. Outra possibilidade é usar a energia do rebolo para transmitir ao fluido a velocidade necessária ao bom funcionamento do processo.

As tubeiras tipo sapata projetadas neste trabalho usam a energia do rebolo para melhorar o fornecimento de fluido. As sapatas possuem uma curvatura semelhante a do rebolo, o que possibilita o arraste do fluido pelo rebolo ao mesmo tempo em que não permite a entrada de ar.

O projeto e o desenho dos componentes da tubeira (anexo A) foram efetuados com auxílio de programas comerciais de CAD. A partir dos desenhos foi gerado o programa para a usinagem dos componentes em fresadora CNC, empregando o programa EDGECAM.

Tubeira A tipo sapata de canal simples

Desenhada para comparar com as tubeiras com escoamento de fluido guiados, a tubeira A tipo sapata de canal simples (Fig. 3.1), tem concepção simples e reduz o efeito prejudicial do colchão de ar no fornecimento de fluido, ao mesmo tempo em que direciona o fluido para a região de corte. O projeto aqui apresentado possibilita que o fluido seja lançado próximo da região de trabalho, sendo que a área interna da tubeira não sofre variações bruscas na forma da seção, mantendo as mesmas dimensões desde a entrada do fluido até sua saída junto ao rebolo.

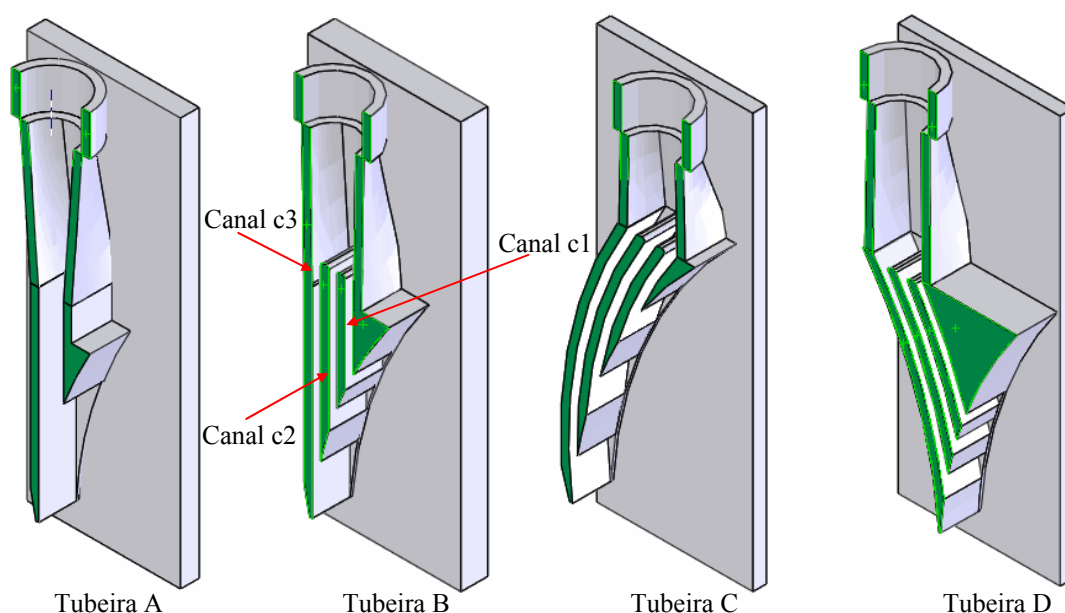


Figura 3.1 – Tubeira tipo sapata com diferentes formatos de canais

Tubeira B tipo sapata reta com três canais

Essa tubeira tem concepção diferente do mostrado anteriormente. Neste, os canais são retos (Fig. 3.1). O canal c1 e o canal c2, a direira da tubeira, têm a função de desobstruir o rebolo e eliminar o colchão de ar que se forma em torno do rebolo na retificação de alta velocidade. O canal c3, à esquerda, fornece o fluido a região de trabalho livre de perturbações geradas pelo rebolo e pelo colchão de ar. A vantagem desse tipo de concepção é a facilidade de sua fabricação; a desvantagem é que a tangência dos canais da tubeira em relação ao rebolo se mantém somente no canal c3 próximo à peça. A área dentro dos canais que levam o fluido para a região de contato se mantém constante ao longo de todo o seu comprimento. A camada de ar que se forma pelo giro do rebolo é afastada pela tubeira.

Tubeira C tipo sapata côncava com três canais

O desenho da tubeira C tipo sapata côncava com três canais é mostrado na Figura 3.1. Essa forma geométrica mostra se o ângulo de incidência do fluido sobre o rebolo influencia o escoamento do fluido, quando o mesmo entra em contato com o rebolo que gira em alta velocidade. Aqui o ângulo de incidência negativo, tangencial, indica que com o aumento da velocidade possa haver um aumento na perturbação, porque a componente de força que joga o fluido contra o rebolo é diminuída. A tubeira, apoiada sobre o rebolo, impede o surgimento de folgas entre a tubeira e o rebolo. Os raios côncavos dos canais possuem o mesmo valor do raio do rebolo. A camada de ar que se forma pelo giro do rebolo é afastada pela tubeira. A área dentro dos canais que levam o fluido para a região de contato se mantém constante ao longo de todo o seu comprimento.

Tubeira D tipo sapata convexa com três canais

Esse desenho de tubeira prevê a incidência radial do fluido sobre o rebolo, possibilitando uma limpeza mais eficiente dos poros do rebolo (Fig. 3.1). Os raios convexos dos canais possuem o mesmo valor do raio do rebolo. A tangência dos canais com o rebolo não é observada no ponto de contato com o rebolo. O escoamento do fluido é realizado em uma seção de área que não varia desde a entrada nos canais, até as proximidades do rebolo. A área dentro dos canais é igual à área da tubulação que conduz o fluido. A camada de ar que se forma pelo giro do rebolo é afastada pela tubeira. A incidência do fluido sobre o rebolo é radial. Como consequência, a limpeza do rebolo é mais eficiente.

Para verificar a programação CNC realizada para usinagem e características dimensionais, inicialmente as tubeiras foram fabricadas em resina poliuretânica expandida de média densidade, Fig. 3.2. Estes testes de usinagem do perfil das tubeiras foram utilizados para definir a viabilidade de fabricação dos perfis projetados assim como orientar posterior montagem no equipamento de retificação. A fabricação de cada metade do protótipo em resina requereu 4 horas de usinagem.

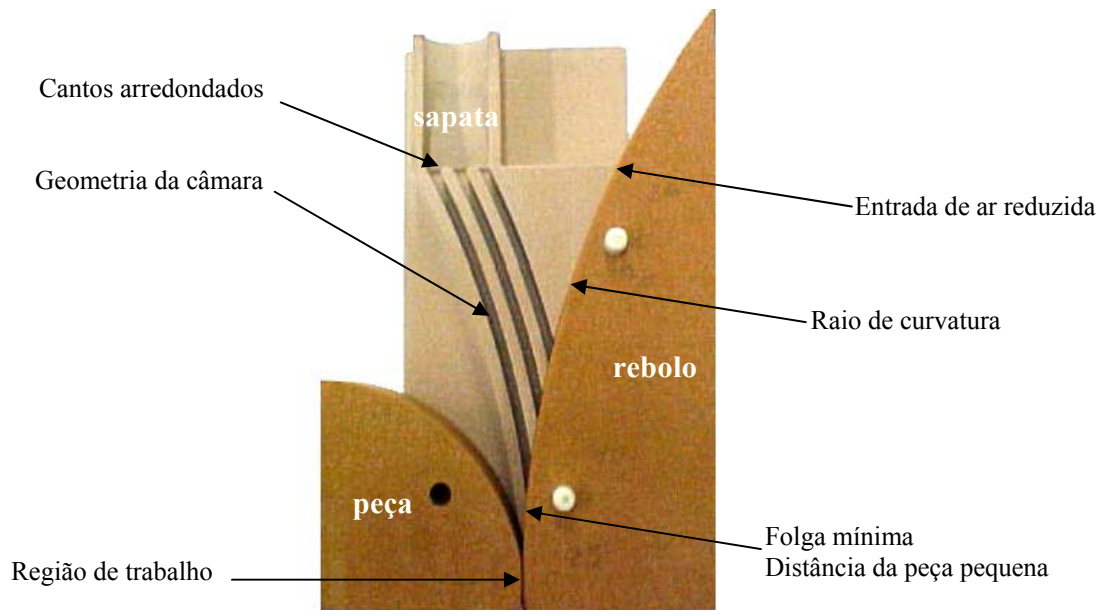


Figura 3.2 – Protótipo em resina poliuretânica mostrando a montagem do conjunto tubeira, rebolo e peça.

Para possibilitar a filmagem do escoamento no interior das tubeiras estas foram fabricadas em acrílico. Os blocos de acrílico foram usinados em um centro de usinagem vertical, dando origem às tubeiras bipartidas, que após polimento foram coladas (Fig. 3.3). A fabricação de cada metade do protótipo em acrílico requereu 8 horas de usinagem.

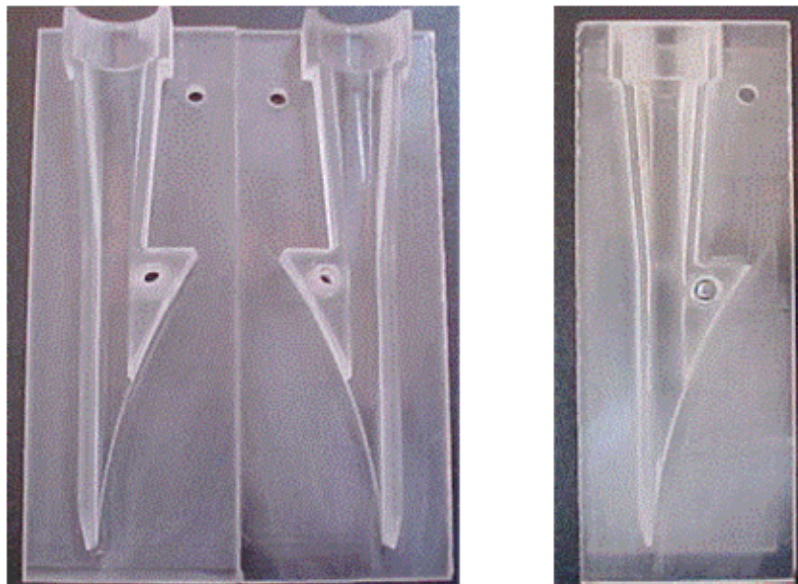


Figura 3.3 – Tuberia A tipo sapata de canal simples bipartida fabricada em acrílico.

3.2 Área de contato entre rebolo e tubeira

Para as diferentes tubeiras fabricadas a área de contato efetiva entre tubeira e a circunferência do rebolo é variável, função da geometria das nervuras e ângulo de inclinação destas nervuras em relação à superfície do rebolo.

A tubeira A tipo sapata de canal simples possui uma única região de contato de área igual a 504 mm^2 , a tubeira D convexa com três canais possui três regiões de contato que somam 560 mm^2 , a tubeira B reta com três canais possui três regiões de contato que somam 798 mm^2 , e a tubeira C côncava com três canais possui três regiões de contato que totalizam 952 mm^2 .

3.3 Bancada de ensaios

A avaliação das tubeiras é efetuada em uma bancada especificamente desenvolvida para ensaios até a velocidade periférica de 120 m/s. Este capítulo apresenta esta bancada e descreve os passos que foram necessários para a sua validação. As principais tecnologias que fundamentam são descritas e os principais elementos físicos que o compõem são caracterizados.

3.3.1 Máquina ferramenta

Para realização dos ensaios, foi utilizada uma retificadora cilíndrica universal, marca MELLO, modelo UNS – 2 (anexo B). A máquina dispõe de dois sistemas de deslocamento, ambos hidráulicos, sendo um para a mesa porta-peça (longitudinal) e o outro para o carro porta-rebolo (transversal). O ajuste manual fino de deslocamento da mesa permite incrementos de $2,5 \text{ }\mu\text{m}$.

A retificadora cilíndrica convencional possibilita velocidades periféricas máximas de 28 m/s com rebolo de óxido de alumínio vitrificado. Para trabalhar com velocidades maiores foi instalado um inversor de frequência, o motor principal foi substituído por um motor de dois pólos de 2,2 kW, a polia acoplada ao motor principal foi aumentada e o rebolo integral de óxido de alumínio vitrificado foi substituído por um disco de alumínio revestido com uma camada abrasiva com ligante resinoide. Devido ao baixo peso do disco de alumínio revestido quando comparado ao rebolo integral de óxido de alumínio foi possível aumentar em

aproximadamente 430% a velocidade do rebolo sem problemas de balanceamento dinâmico ou danificação do eixo árvore da retificadora. A área de trabalho foi encapsulada. O sistema de bombeamento de fluido lubri-refrigerante foi adequado com o sistema de suporte das sapatas e manômetros próximo à tubeira.

O inversor de frequência WEG, modelo CFW-04, possibilita a variação contínua da rotação do rebolo. Para uma velocidade periférica de zero até 120 m/s.

O rebolo foi balanceado estaticamente com auxílio de um tripé nivelado, sendo montado em um eixo. Este conjunto foi disposto sobre o cavalete nivelado e as massas de balanceamento deslocadas na ranhura circunferencial do flange até obter um balanceamento estático permitido por este sistema.

Com as modificações realizadas na retificadora foi possível alcançar uma rotação de 7.643 rpm do rebolo alcançando uma velocidade periférica de 120 m/s, tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Rotação, velocidade periférica do rebolo e frequência usados nos ensaios.

Frequência [Hz]	Rotação (N) [rpm]	Velocidade periférica [m/s]
44	3820	60
58	5095	80
73	6369	100
89	7643	120

O encapsulamento da máquina na região próxima do rebolo foi necessária para evitar a dispersão do fluido para o ambiente provocado pelo sistema de alimentação e pela elevada rotação do rebolo. Para possibilitar a filmagem da passagem do fluido pela tubeira, o encapsulamento, assim como as tubeiras, foi realizado em acrílico (Fig. 3.4).

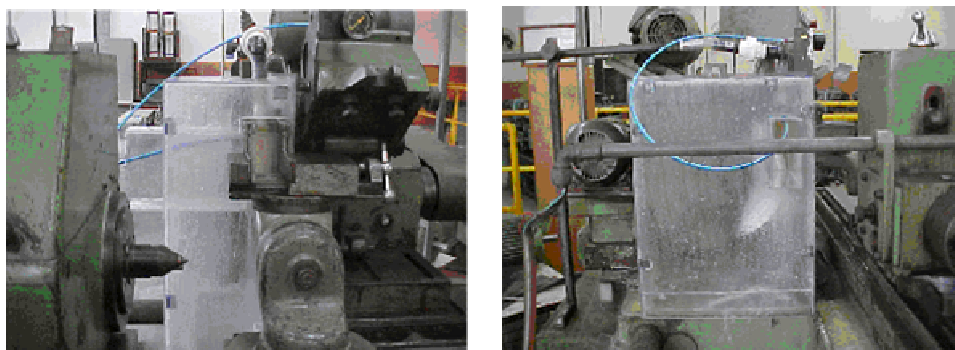


Figura 3.4 – Encapsulamento do rebolo e tubeira.

3.3.2 Rebolo

Para avaliar a influência de diferentes topografias de rebolos sobre o transporte de fluido no emprego de sapatas de alimentação de fluido lubri-refrigerante e poder simular numericamente o escoamento do fluido na tubeira e interface entre tubeira e rebolo, foi concebido um disco de alumínio com recartilhamento periférico definido. O recartilhamento simula topografias distintas na superfície do disco para caracterizar processos diferentes de retificação (retificação com topografia agressiva e menos agressiva), Fig. 3.5.

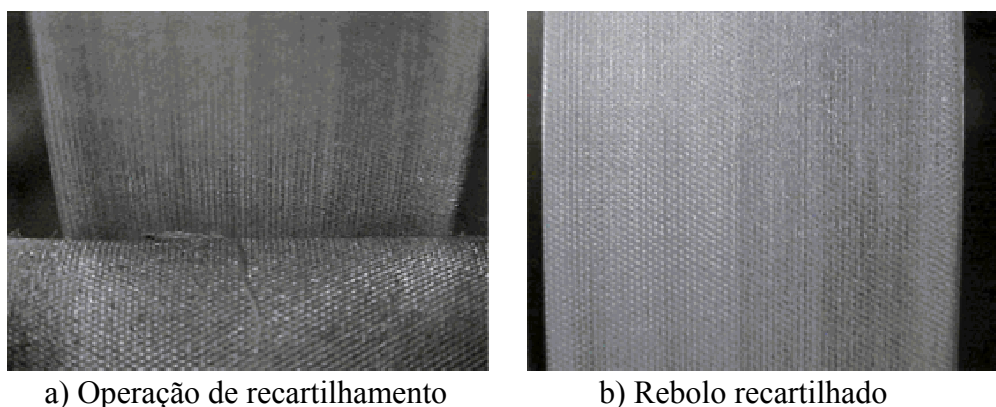
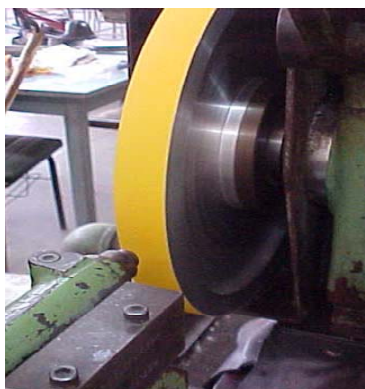


Figura 3.5 – Operação de recartilhamento do rebolo e rebolo recartilhado.

Para comparar os valores obtidos com o disco de alumínio recartilhado com rebolo abrasivo foi fabricado um rebolo com um núcleo de alumínio. A aplicação de camada abrasiva sobre o disco, empregando uma fita abrasiva, não logrou êxito. A lixa abrasiva colada sobre o núcleo de alumínio (Fig. 3.6-a) soltava quando o disco começava a girar em alta velocidade na presença do líquido lubri-refrigerante.

A Figura 3.6-b mostra o desgaste da lixa abrasiva causado pelo impacto do fluido lubri-refrigerante na superfície do disco revestido girando em alta velocidade. Neste ensaio a lixa usada era colada sobre o disco com adesivo plástico, sendo que o desgaste iniciava na região da emenda.



a) Lixa colada sobre disco de alumínio



b) Desgaste da superfície da lixa

Figura 3.6 – Disco de alumínio revestido com lixa abrasiva

Para permitir as velocidades periféricas de 120 m/s foram usinadas ranhuras cauda de andorinha na periferia do disco de alumínio, Fig. 3.7, e aplicada uma camada de abrasivo de óxido de alumínio com granulometria 60 Mash (número de aberturas por polegada linear de uma malha) com ligante resinoide. Estas características foram escolhidas porque nos fornece um disco abrasivo revestido com granulometria média, dureza mole, estrutura fechada que nos permite retificar a superfície da tubeira para zeramento no início do processo.

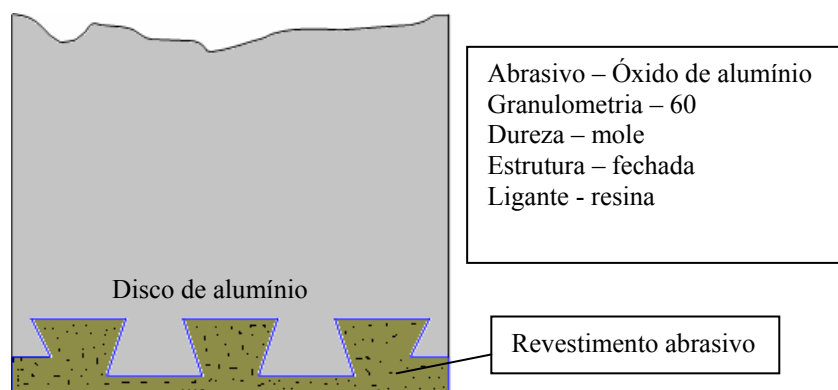


Figura 3.7 – Ranhuras com formato de cauda de andorinha para ancoragem do revestimento abrasivo.

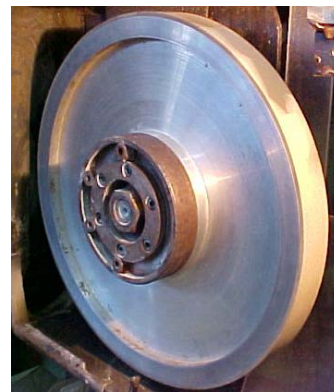
Este rebolo foi perfilado na forma de um rebolo cilíndrico reto, Fig. 3.8 e dressado com diferentes graus de recobrimento, tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Valores de rotação do rebolo e velocidade de avanço do dressador para diferentes graus de recobrimento.

Ud	Frequência [Hz]	Rotação (N) [rpm]	Avanço do dressador por revolução (S_d) [mm/volta]	Velocidade de avanço do dressador (V_{fad}) [mm/s]
1	23	2000	0,30	10
2	23	2000	0,30	5
3	34	3000	0,30	5
3,5	40	3500	0,30	5



a) Camada abrasiva



b) Perfil do rebolo

Figura 3.8 – Rebolo com núcleo de alumínio.

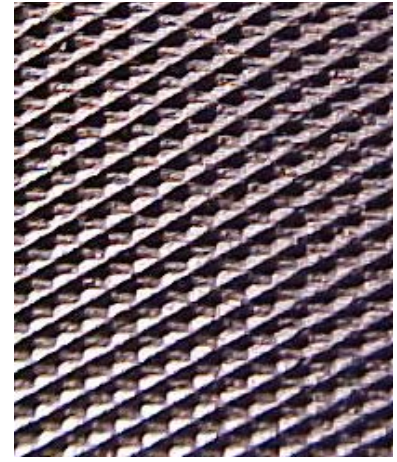
A Figura 3.9 mostra as topografias das superfícies de um rebolo de óxido de alumínio comercial, a superfície do revestimento abrasivo resinoide e a do disco recartilhado.



a) Óxido de alumínio



b) Revestimento abrasivo resinoide



c) Recartilhado

Figura 3.9 – Comparação entre as superfícies obtidas e a superfície do rebolo de óxido de alumínio.

3.3.3 Sistema de alimentação de fluido lubri-refrigerante

O sistema original de suprimento de fluido lubri-refrigerante da retificadora MELLO consiste de uma bomba centrífuga de 0,37 kW (0,5 CV) com pressão de alimentação máxima de 50.000 N/m^2 , uma tubeira de jato livre (tubo cilíndrico esmagado) com um tanque de armazenamento de 60 litros com um sistema de filtragem magnético para separação dos cavacos. Para os ensaios o sistema foi dotado de um manômetro na tubeira, Fig. 3.10. A vazão de fluido é medida com auxílio de um hidrômetro e regulada por um circuito paralelo (*bypass*). Nesse sistema, a vazão na tubeira é regulada a partir da diferença entre a vazão fornecida pela bomba e a vazão regulada no registro de derivação.

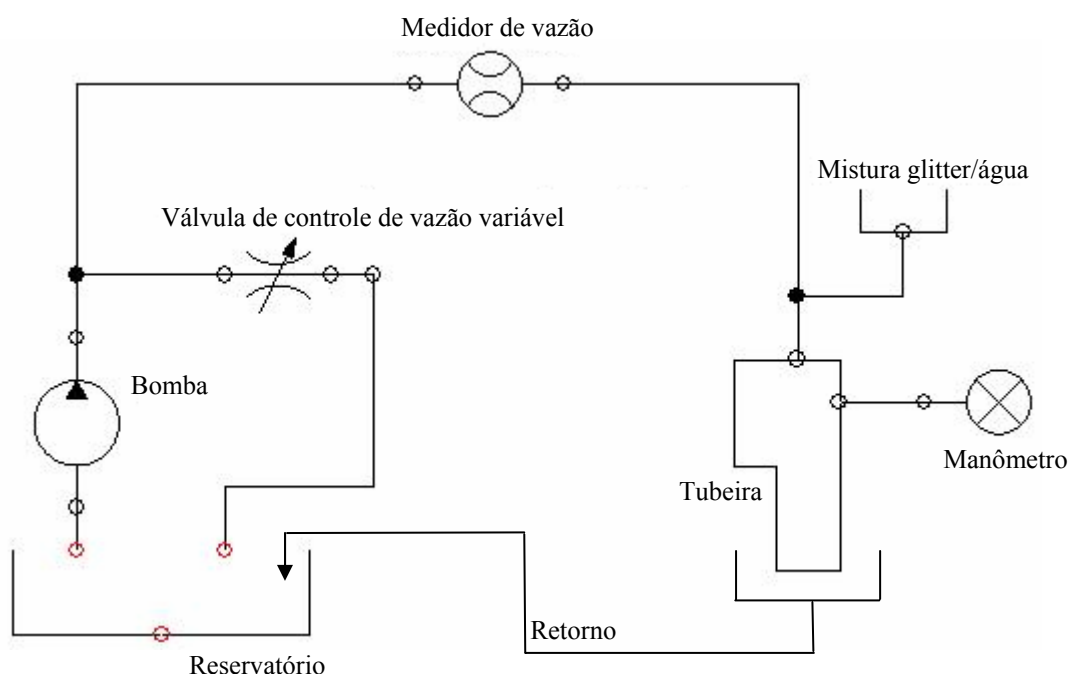


Figura 3.10 – Esquema do sistema de fornecimento do fluido lubri-refrigerante.

3.3.4 Sistema de aquisição de imagens dos fluxos (Câmera de vídeo)

Para fazer a documentação do escoamento de fluido lubri-refrigerante nas tubeiras foi empregada uma câmara CCD de aquisição das imagens (anexo C), com taxa de aquisição de 100 quadros por segundo (completo) ou 4000 quadros por segundo (parcial), o que permite avaliar o comportamento do escoamento do fluido lubri-refrigerante no interior das tubeiras.

3.3.5 Sistema de posicionamento da sapata

Para permitir a fixação da sapata em uma posição preestabelecida na retificadora foi adaptada uma morsa na mesa transversal, que possibilita ajustar a posição relativa da tubeira ao rebolo no plano horizontal (X, Z). A posição vertical da tubeira em relação ao rebolo (saída da tubeira 10 mm acima da linha de centro do rebolo) é determinada por uma posição de referência nos mordentes da morsa, especialmente fabricadas para esta finalidade. A morsa tem como função principal a fixação de forma rígida da tubeira, permitindo ajustes angulares. O deslocamento da mesa permite ajustar a tubeira em relação à largura do rebolo no eixo X e com a aproximação do rebolo à tubeira é definida a abertura da fenda entre a tubeira e o rebolo no eixo Z, Fig. 3.11.

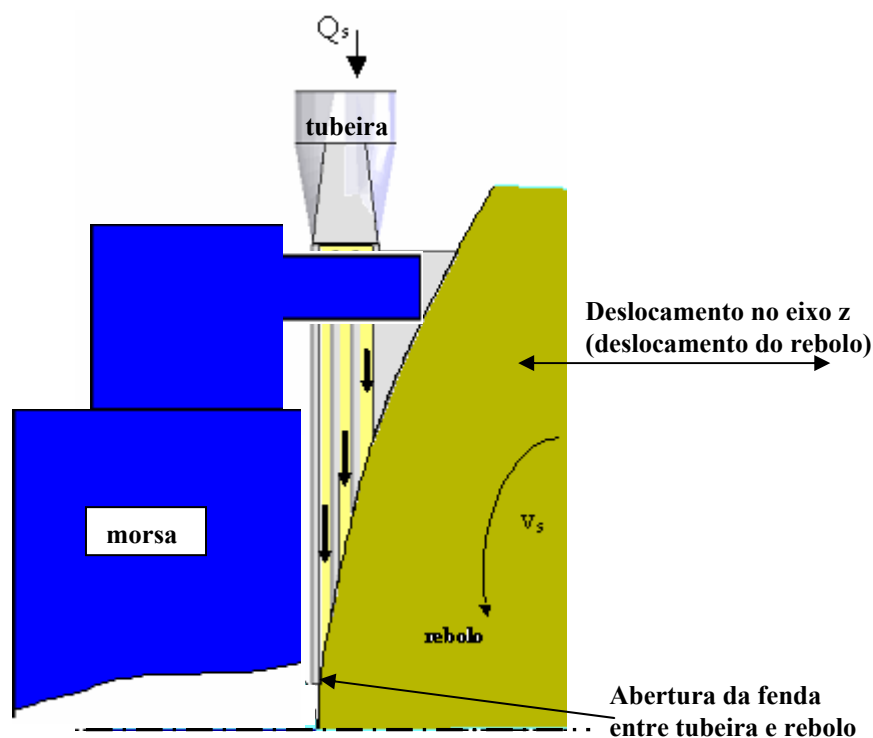


Figura 3.11 – Esquema indicando o deslocamento em z do rebolo.

3.4 Análise da exatidão das grandezas de entrada

A aferição é um procedimento experimental através do qual são estabelecidas, sob condições específicas, as relações entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões

(Albertazi, 2002). Assim, foram realizadas comparações entre os valores de determinados parâmetros ajustados na máquina e os valores medidos por instrumentos de medição calibrados específicos para cada caso, com o objetivo de verificar as variáveis de entrada inerentes à máquina-ferramenta e correção de erros sistemáticos. Estes valores são apresentados a seguir.

3.4.1 Velocidade angular do rebolo

A verificação da velocidade angular do rebolo foi realizada com um tacômetro digital Minipa, modelo MDT-2244. Este tacômetro determina o tempo de uma rotação do rebolo estabelecido pelo intervalo de tempo entre reflexos de um feixe de luz emitido e captado pelo aparelho. Para obter uma reflexão com características adequadas um segmento de fita reflexiva é colado sobre o objeto em rotação, (Fig. 3.12).

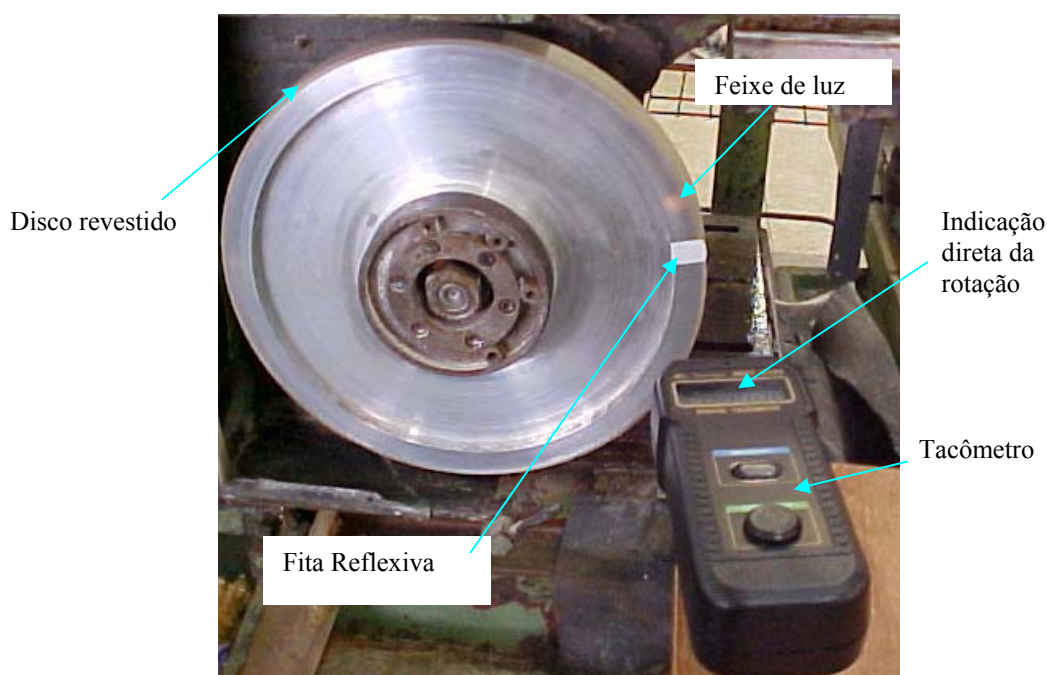


Figura 3.12 – Medição da rotação do rebolo com tacômetro digital.

O erro entre o valor de rotação teórico e o valor medido no tacômetro foi avaliado. As diferenças medidas não foram significativas para a faixa de velocidade escolhida visto que a diferença entre o número de rotações teórico e a média do número de rotações medidas, para todas as velocidades, não ultrapassou 0,9%. Desta forma não se fez necessária uma correção

dos valores. A tabela 3.3 apresenta os valores teóricos e medidos além do erro associado à diferença entre eles.

Tabela 3.3 – Verificação da velocidade angular do rebolo.

Velocidade angular teórica [m/s]	Número de rotações teórico [rpm]	Média do número de rotações medidas [rpm]	Veloc. angular calculada [m/s]	Erro %
60	3809	3843,3	60,5	0,8
80	5078	5110,6	80,5	0,6
100	6348	6361,3	100,2	0,2
120	7618	7685,5	121,06	0,9

3.4.2 Pressão e vazão de alimentação do fluido refrigerante

A pressão de alimentação de fluido refrigerante foi monitorada usando um manômetro com menor divisão de escala de 10.000 N/m^2 e faixa de medição de 250.000 N/m^2 . O manômetro foi instalado na tubeira de alimentação com a finalidade de minimizar erros advindos da perda de carga ao longo da tubulação, (Fig. 3.13).

Medições da pressão no interior da tubeira, tabela 3.4, mostram que mesmo para uma abertura da fenda entre rebolo e tubeira muito próximo de zero, velocidade periférica do rebolo de 60 m/s e vazão da bomba de 10 l/min, as pressões medidas não ultrapassaram 50.000 N/m^2 .



Figura 3.13 – Manômetro para medição da pressão interna da tubeira.

Tabela 3.4 – Pressão interna a tubeira e vazão para diferentes fendas de trabalho.

Abertura da fenda entre rebolo e tubeira [mm]	Vazão medida [l/min]	Corrente consumida [Amperes]	Pressão medida [N/m ²]
0,00	10,0	4,20	50.000
0,12	10,0	4,14	40.000
0,31	10,0	4,05	30.000
0,55	10,0	3,90	20.000
0,89	10,0	3,80	10.000
1,40	10,0	3,55	0,0

A vazão do fluido era medida com um hidrômetro fabricado pela FAE Tecnologia, modelo DELTA MTF IX instalado em série com o sistema de alimentação. A aferição da vazão foi efetuada com uma resolução de 0,0001 m³, sendo tomadas medidas de vazão em intervalos de 10 segundos. A verificação do hidrômetro através da pesagem do fluido (água) coletado durante 20 segundos, conforme Bertalan, 1997 e da Silva, 2000, tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Valores de vazão medidos no hidrômetro.

Vazão lida [l/min]	Vazão medida [l/min]	Diferença entre a vazão lida e medida	Erro [%]
10,0	10,1	0,1	1
20,0	19,9	0,1	0,5

3.4.3 Abertura da fenda entre rebolo e tubeira

A abertura da fenda entre rebolo e tubeira era determinada pelo deslocamento da mesa da retificadora na direção **z** (radial). A retificação da face da tubeira pelo rebolo até atingir uma coincidência de raios de curvatura da tubeira e do rebolo, define a fenda nula entre rebolo e tubeira. Nesta posição o colar da retificadora era zerado. O afastamento do rebolo da tubeira leva a formação de uma fenda entre os dois. Esta fenda é variável ao longo da circunferência do rebolo, uma vez que o afastamento do rebolo se dá apenas na direção radial. A fenda variável ao longo da circunferência do rebolo não influi na avaliação dos resultados porque todos os ensaios tiveram essa mesma condição e a avaliação é comparativa entre as tubeiras ensaiadas. A abertura da fenda na parte inferior da tubeira, no entanto coincide com o

deslocamento do rebolo. Os deslocamentos da mesa são acompanhados por um relógio comparador.

3.5 Determinação da potência

A determinação da potência necessária para acelerar o fluido lubri-refrigerante pela ação do rebolo é realizada medindo a corrente e tensão diretamente no inversor de frequência. Com o motor em funcionamento o inversor de frequência nos fornece em um leitor digital os valores de corrente consumida com incerteza de medição de 0,1 Amperes. O princípio de medição da potência baseia-se na medição da corrente em um dos terminais e a tensão entre os outros dois terminais do motor trifásico que aciona o rebolo, equação 3.1.

$$P_c = \left(\sqrt{3} \cdot V_a \cdot \Delta I \cdot \cos \varphi \right) \div 1000 \text{ (kw)} \quad (3.1)$$

Determina-se a potência pelo motor de acionamento do rebolo em vazio (sem o uso de fluido) e, em seguida, determina-se a potência consumida com o fluido acionado. A diferença das potências verificadas nos fornece o valor da potência requerida para acelerar o fluido. Cada ensaio foi realizado com ajuste de parâmetros como segue:

- 1- Ajustar a abertura da fenda entre o rebolo e a tubeira.
- 2- Regular através do inversor de frequência a velocidade periférica do rebolo.
- 3- Realizar a medição da corrente consumida em vazio no painel do inversor de frequência.
- 4- Regular a vazão do fluido através da válvula de controle de vazão e medir a corrente consumida para impulsionar o fluido.

Os valores de velocidade periférica do rebolo, abertura da fenda entre rebolo e tubeira e vazão usados durante o ensaio foram:

Velocidade periférica do rebolo: 60; 80; 100 e 120 m/s. Estes valores foram usados porque definem uma faixa de transição entre velocidades consideradas convencionais (baixas velocidades) e altas velocidades (120 a 200 m/s). A maioria dos trabalhos já realizados mostra resultados que estão nesta faixa de velocidade e o uso destes valores facilitará a comparação de resultados.

Abertura da fenda entre rebolo e tubeira: zero; 0,25; 0,50; 0,75 e 1,0 mm. Para abertura da fenda entre rebolo e tubeira foram utilizados estes valores inicialmente porque a

literatura indicava que com uma abertura de fenda zero teríamos bons resultados de bombeamento do fluido pelo rebolo.

Vazão: 5,0; 10,0 e 15,0 l/min. A vazão mais indicada para a refrigeração com tubeira tipo sapata segundo a literatura é 10 l/min, logo foram tomados valores próximos acima e abaixo para verificar tais afirmações.

Pressão de alimentação do fluido: 0,0; 10.000; 20.000; 30.000; 40.000 e 50.000 N/m², valores obtidos a partir da medição da pressão no interior da tubeira com as características de bomba já existentes na máquina retificadora, para abertura de fendas estipuladas acima.

A Figura 3.14 mostra o fluxograma dos ensaios para avaliar a potência consumida para acelerar o fluido na tubeira. Inicialmente foram realizados ensaios com variação da velocidade periférica, enquanto a topografia, a vazão e a abertura da fenda entre rebolo e tubeira permaneceram constantes. Depois foram realizados ensaios com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira. Em seguida, a vazão foi variada e por último alterou-se a topografia do rebolo. Esses ensaios foram realizados para os quatro tipos de tubeiras e replicados três vezes cada um, totalizando 1.440 ensaios.

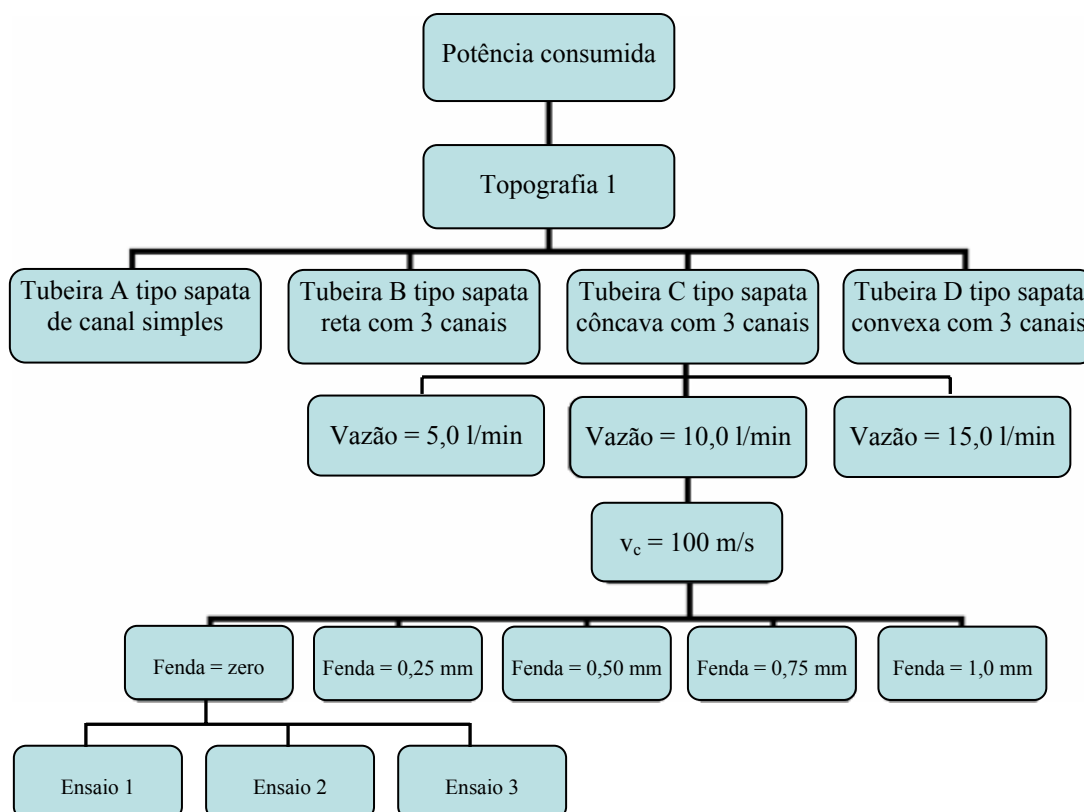


Figura 3.14 – Fluxograma da sequência dos ensaios para avaliar a potência consumida.

A influência da topografia do rebolo foi avaliada para dois graus de recobrimento. Com o objetivo de determinar a influência da topografia do rebolo no bombeamento do fluido através da análise da potência consumida no eixo do rebolo. Um rebolo mais agressivo com poros mais fechados impulsiona com mais eficiência o fluido do que um rebolo com menor quantidade de poros tendo sua forma mais aberta, indicando que o rebolo mais agressivo apresente um maior consumo de potência do que o rebolo menos agressivo. Complementarmente foram efetuadas análises com discos recartilhados, simulando rebolos com topografia definida (*engineered grinding wheels*), que é uma tendência dos estudos apresentados por novas pesquisas no uso de rebolos para retificação de alta velocidade com superabrasivos, rebolos estruturados.

3.5.1 Influência da velocidade periférica na potência consumida

A velocidade de corte (periférica) é um dos parâmetros de processo mais importantes na retificação. A aplicação de velocidades de corte cada vez maiores é uma realidade na prática industrial. Este ensaio avalia a potência consumida necessária para impulsionar o fluido de corte, com o aumento da velocidade periférica. Os parâmetros empregados estão detalhados na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Parâmetros empregados nos ensaios de potência consumida para os diferentes tipos de tubeiras com variação da velocidade.

Denominação	v_s [m/s]	Vazão [l/min]	Pressão [N/m ²]	Abertura da fenda entre rebolo e tubeira [mm]	Grau de recobrimento (U_d)
Ensaio 1	60	10	30.000	0,25	1
Ensaio 2	80	10	30.000	0,25	1
Ensaio 3	100	10	30.000	0,25	1
Ensaio 4	120	10	30.000	0,25	1

3.5.2 Influência da abertura da fenda entre rebolo e tubeira na potência consumida

De acordo com a literatura, uma das dificuldades do emprego da sapata como tubeira na indústria se deve à necessidade de constante ajuste da sua posição em relação ao rebolo,

visto que o rebolo desgasta e é perfilado constantemente. Este ensaio determina a influência da abertura da fenda entre rebolo e tubeira, posição relativa entre sapata e rebolo, na potência consumida no rebolo. A tabela 3.7 apresenta o conjunto de parâmetros utilizados na realização desses experimentos para quatro tipos de tubeiras.

Tabela 3.7 – Parâmetros empregados nos ensaios de potência consumida para os diferentes tipos de tubeiras com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira.

Denominação	v_s [m/s]	Vazão [l/min]	Pressão [N/m ²]	Abertura da fenda entre rebolo e tubeira [mm]	Grau de recobrimento (U_d)
Ensaio 1	60	10	50.000	Zero	1
Ensaio 2	60	10	30.000	0,25	1
Ensaio 3	60	10	20.000	0,50	1
Ensaio 4	60	10	10.000	0,75	1
Ensaio 5	60	10	0,0	1,0	1

Estes ensaios foram também realizados para velocidade de 100 m/s, para avaliar se a potência consumida mudaria quanto à variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira para velocidades maiores. Para as demais velocidades não se realizou os ensaios porque tínhamos como objetivo nestes ensaios analisar a tendência do comportamento do consumo de potência com variação da velocidade, logo uma velocidade considerada baixa (60 m/s) e uma velocidade considerada alta (100 m/s) seriam suficientes.

3.5.3 Influência da vazão do fluido de corte na potência consumida

A condição básica para o transporte do fluido para a zona de contato é uma boa umidificação do rebolo e da peça com o agente lubri-refrigerante. Uma boa umidificação não necessariamente significa o uso de uma grande quantidade de fluido, porém a forma como esse fluido é entregue à zona de contato é muito importante na melhoria do processo. O jato de fluido fora de posição, defletido, com baixa velocidade de saída ou excesso de dispersão, combinado com um rebolo de baixa porosidade, influencia a quantidade de fluido que efetivamente atinge a região de corte.

O objetivo desse ensaio é determinar a influência do aumento da vazão do fluido de corte na potência consumida. A tabela 3.8 apresenta o conjunto de parâmetros utilizados na realização desses experimentos. Esses ensaios foram também realizados utilizando a velocidade periférica do rebolo de 100 m/s, para verificar a tendência do consumo de potência com aumento da velocidade periférica.

Tabela 3.8 – Parâmetros empregados nos ensaios de potência consumida para os diferentes tipos de tubeiras com variação da vazão.

Denominação	v_s [m/s]	Vazão [l/min]	Pressão [N/m ²]	Abertura da fenda entre rebolo e tubeira [mm]	Grau de recobrimento (U_d)
Ensaio 1	60	5,0	20.000	0,25	1
Ensaio 2	60	10,0	30.000	0,25	1
Ensaio 3	60	15,0	40.000	0,25	1

3.5.4 Influência da topografia do rebolo na potência consumida

Para comparar o desempenho das quatro sapatas usadas nestes experimentos (tubeira A tipo sapata de canal simples, tubeira B tipo sapata reta com três canais, tubeira C tipo sapata côncava com três canais e tubeira D tipo sapata convexa com três canais) quanto à potência consumida no direcionamento do fluido de corte para a região de trabalho, quando a topografia da superfície do rebolo é modificada, foi utilizado um rebolo recartilhado, onde as irregularidades da superfície são bastante significativas, e um revestido, com grau de recobrimento U_d igual a um, onde as irregularidades da superfície são menores. As comparações são feitas para as condições de ensaio dados nas tabelas 3.7 e 3.9. Sendo que foi avaliado, também, a velocidade de 100m/s.

Tabela 3.9 – Parâmetros empregados nos ensaios de potência consumida para diferentes tipos de tubeiras com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira com rebolo recartilhado.

Denominação	v_s [m/s]	Vazão [l/min]	Pressão [N/m ²]	Abertura da fenda entre rebolo e tubeira [mm]	Topografia do rebolo
Ensaio 1	60	10	40.000	0,15	Recartilhado
Ensaio 2	60	10	30.000	0,30	Recartilhado
Ensaio 3	60	10	20.000	0,50	Recartilhado
Ensaio 4	60	10	0,0	1,0	Recartilhado

3.6 Escoamento do fluido dentro da tubeira

A avaliação do escoamento foi realizada utilizando uma ferramenta da simulação numérica e a filmagem do escoamento do fluido passando no interior da tubeira. A simulação numérica usou a metodologia de solução de volumes finitos e o código computacional aplicado foi o CFX5. 7 (Código Computacional Comercial 5.7) (Ansys Inc., 2004). O método CFX5. 7 consiste na divisão do domínio de solução em pequenos volumes de controle, utilizando uma malha computacional.

A simulação numérica foi realizada para velocidades de 60 e 100 m/s, pressão de 50.000 N/m², vazão de 10 l/min e fendas de 0,5 e 1,0 mm com objetivo de definir as regiões da tubeira onde as perturbações do fluido eram mais intensas, para posterior filmagem destas regiões. Os ensaios de simulação numérica foram realizados para aberturas de fendas entre rebolo e tubeira grandes, acima de 0,5 mm, porque com fendas pequenas a simulação não pode ser realizada. Na região junto ao rebolo existem gradientes muito intensos em um espaço muito reduzido. Para que a avaliação possa ser feita é necessário um número muito grande de volumes finitos, e isso se torna inviável uma vez que a tubeira como um todo tem dimensões relativamente grandes. Fica difícil fazer a simulação com um grande número de volumes finitos pequenos próximos do rebolo, e ter o seu tamanho progressivamente aumentado na medida em que eles são expandidos para o restante da tubeira. Em geral o que ocorre é um erro durante a solução do escoamento, acusado pelo código computacional CFX.

A filmagem do escoamento, Fig. 3.15, foi realizada em regiões de interesse definidas na simulação numérica, com fluido impregnado com partículas rastreadoras (glitter), com velocidade de filmagem limitada a 100 quadros por segundo, devido a limitações na velocidade de processamento do programa computacional. Para fazer a aquisição das imagens deste trabalho foi necessário utilizar uma câmera de vídeo com uma taxa de aquisição de dados acima do normalmente encontrado no mercado de câmeras de vídeo. A taxa de aquisição normal está entre 15 quadros por segundo e 30 quadros por segundo (*frames per second* ou fps). Com uma taxa de aquisição de dados maior pode-se ver com detalhes aquilo que o olho humano não consegue ver.

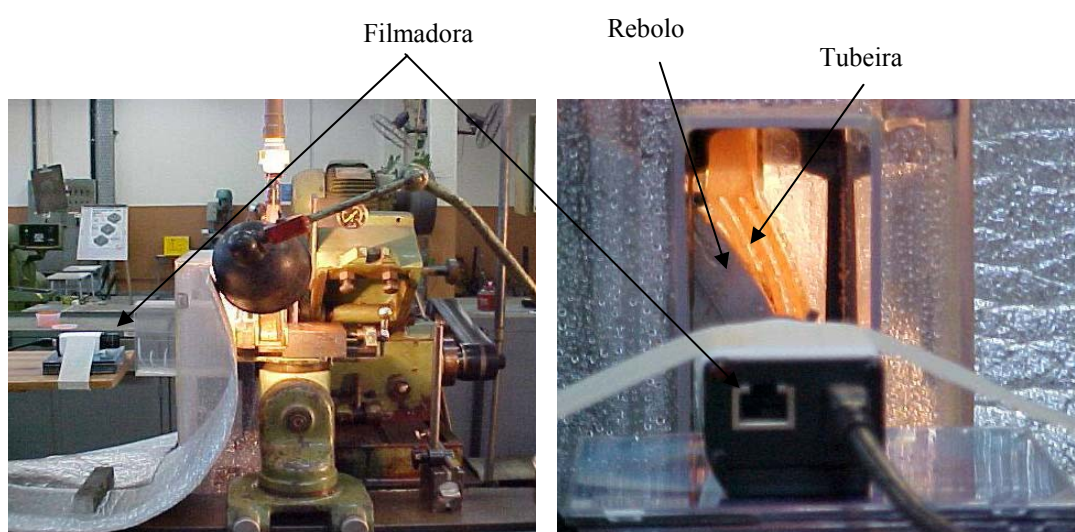


Figura 3.15 – Filmagem das tubeiras e seus canais

Os parâmetros usados nesses ensaios foram: velocidade periférica do disco revestido (60 a 120 m/s); abertura da fenda entre rebolo e tubeira (zero a 2,0 mm) e vazão (5,0 a 15,0 l/min), tabelas 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14. Os valores de velocidades periféricas (60, 80, 100 e 120 m/s) foram usados para estudar da influência da velocidade periférica do rebolo sobre o escoamento do fluido no interior da tubeira. A abertura da fenda com os valores zero; 0,25; 0,50; 0,75 e 1,0 mm, passando por valores intermediários diferentes desses, quando necessário, permitiram o estudo da influência da variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira sobre o escoamento do fluido. Os valores de vazão (5,0; 10,0 e 15,0 l/min) possibilitaram estudar a influência da variável vazão no comportamento do escoamento do fluido quando este passa pela tubeira.

Tabela 3.10 – Parâmetros empregados nos ensaios de escoamento para tubeira**A de canal simples.**

Denominação	v_s [m/s]	Vazão [l/min]	Pressão [N/m ²]	Abertura da fenda entre rebolo e tubeira [mm]	U_d	Filme
Ensaio 1	Variável de 60 a 120	10	30.000	0,25	1	corpo
Ensaio 2	100	10	Variável de 50.000 a zero	Variável de 0,02 a 1,0 mm	1	corpo
Ensaio 3	100	Variável de 5 a 10	30.000	0,25	1	corpo

Tabela 3.11 – Parâmetros empregados nos ensaios de escoamento para tubeira B reta com três canais com variação da velocidade periférica.

Denominação	v_s [m/s]	Vazão [l/min]	Pressão [N/m]	Abertura da fenda entre rebolo e tubeira [mm]	U_d	Filme
Ensaio 1	60 a 120	10	30.000	0,25	1	canal c1
Ensaio 2	60 a 120	10	30.000	0,25	1	canal c2
Ensaio 3	60 a 120	10	30.000	0,25	1	canal c3

A sequência dos ensaios foi organizada de forma que inicialmente foi realizada a filmagem das nervuras entre os canais no interior das tubeiras (Fig. 3.16) que geram um anteparo, que embora tenha a forma arredondada, causam perturbações no escoamento do fluido. Em seguida foram realizadas filmagens da região próxima ao rebolo, o encontro do fluido com a superfície do rebolo em alta velocidade, também tem como consequência uma perturbação no escoamento.

Tabela 3.12 – Parâmetros empregados nos ensaios de escoamento para tubeira B reta com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira.

Denominação	v_s [m/s]	Vazão [l/min]	Pressão [N/m ²]	Abertura da fenda entre rebolo e tubeira [mm]	U_d	Filme
Ensaio 1	100	10	40.000 a zero	0,10 a 2,0	1	canal c1
Ensaio 2	100	10	40.000 a zero	0,10 a 2,0	1	canal c2
Ensaio 3	100	10	40.000 a zero	0,10 a 2,0	1	canal c3

Tabela 3.13 – Parâmetros empregados nos ensaios de escoamento para tubeira B reta com três canais com variação da vazão.

Denominação	v_s [m/s]	Vazão [l/min]	Pressão [N/m ²]	Abertura da fenda entre rebolo e tubeira [mm]	U_d	Filme
Ensaio 1	100	5 a 15	20.000 a 40.000	0,25	1	canal c1
Ensaio 2	100	5 a 15	20.000 a 40.000	0,25	1	canal c2
Ensaio 3	100	5 a 15	20.000 a 40.000	0,25	1	canal c3

Tabela 3.14 – Parâmetros empregados nos ensaios de escoamento para tubeira A de canal simples com variação da topografia do rebolo.

Denominação	v_s [m/s]	Vazão [l/min]	Pressão [N/m ²]	Abertura da fenda entre rebolo e tubeira [mm]	U_d
Ensaio 1	100	10	30.000	Variável de 0,10 a 1,0	1
Ensaio 2	100	10	30.000	Variável de 0,10 a 1,0	3,5

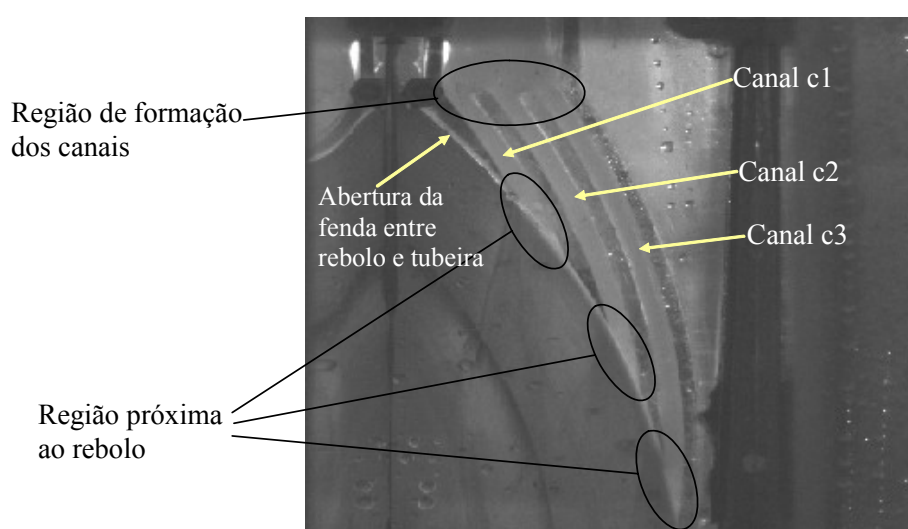


Figura 3.16 – Regiões da tubeira que foram avaliadas nas filmagens.

A Figura 3.17 mostra o fluxograma do plano de ensaios para avaliar o escoamento dentro da tubeira A de canal simples. O ensaio de cada tubeira foi realizado da seguinte maneira: Estabeleceu-se a vazão de 5 l/min, velocidade de 60 m/s, fenda zero, topografia 1 do rebolo e realizou-se 3 réplicas. Terminada esta fase alterou-se a fenda para 0,25 mm e mais três ensaios foram realizados. Este procedimento foi repetido para fenda de 0,50 e 1,0 mm. Em seguida aumentou-se a velocidade para 80 m/s e repetiram-se os passos anteriores. Depois para 100 e 120 m/s. Na análise da variação da vazão, após os ensaios com 5 l/min, aumentou-se para 10 e 15 l/min realizando as filmagens para cada situação. Por último a troca do tipo de tubeira foi realizada e repetiram-se os ensaios. Terminada a análise do escoamento do fluido no interior das tubeiras para a topografia 1, o rebolo foi dressado para a topografia 2 e todos os ensaios foram repetidos mais uma vez. A topografia 1 foi definida pelo disco revestido com $U_d = 1$ e a topografia 2 pelo disco recartilhado.

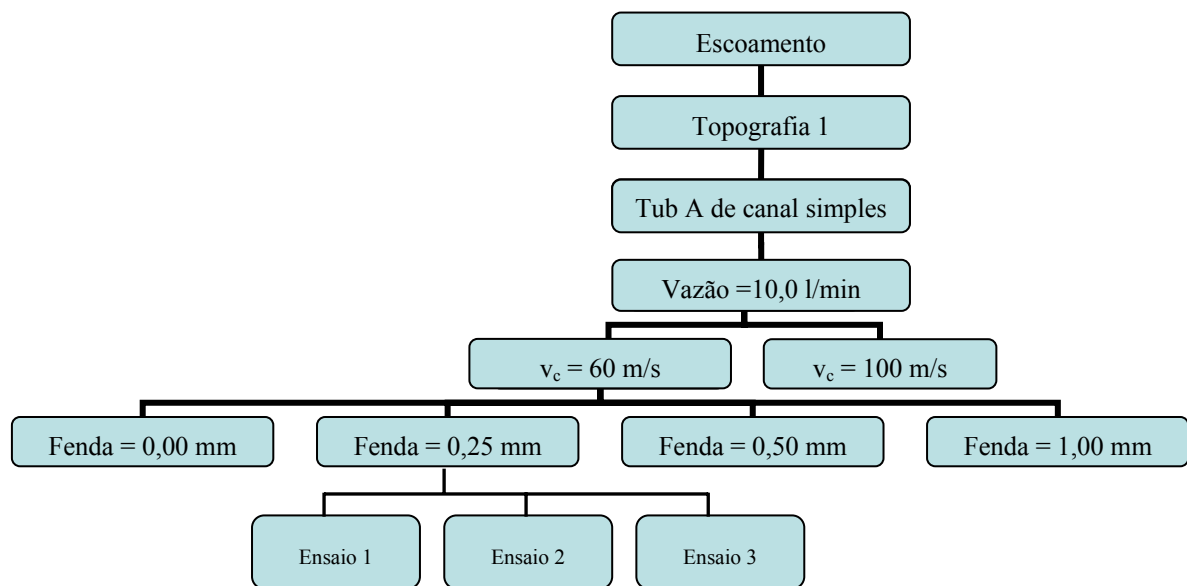


Figura 3.17 – Sistemática utilizada nos ensaios para avaliar o escoamento na tubeira A de canal simples.

Terminada a fase de planejamento e execução experimental, foram realizados os ensaios de potência consumida e escoamento dentro das tubeiras variando a velocidade periférica do rebolo, a abertura da fenda entre rebolo e tubeira, a vazão do fluido e a topografia do rebolo, passou-se a apresentação e discussão dos resultados.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo destaca os resultados de potência consumida para a aceleração do fluido, a simulação numérica do escoamento e a visualização do escoamento no interior das tubeiras.

A análise do comportamento do fluxo do fluido foi realizada no interior do corpo das tubeiras e em cada canal. No corpo da tubeira foi analisado o comportamento do fluido na região de entrada dos canais assim como na região de transição da seção circular de entrada (tubo de alimentação) para a seção retangular do corpo. Os canais possuem uma forma retangular com seção constante. Neles vamos verificar se a seção constante melhora escoamento do fluido, assim como as alterações no escoamento que acontece nos canais junto ao rebolo girando em alta velocidade.

4.1 Influência da velocidade periférica na potência consumida

Para as quatro tubeiras concebidas foi avaliado o consumo de potência decorrente da aplicação do fluido de corte. O gráfico da Figura 4.1 mostra que a potência consumida no eixo do rebolo aumenta para todas as tubeiras com o aumento da velocidade periférica do rebolo.

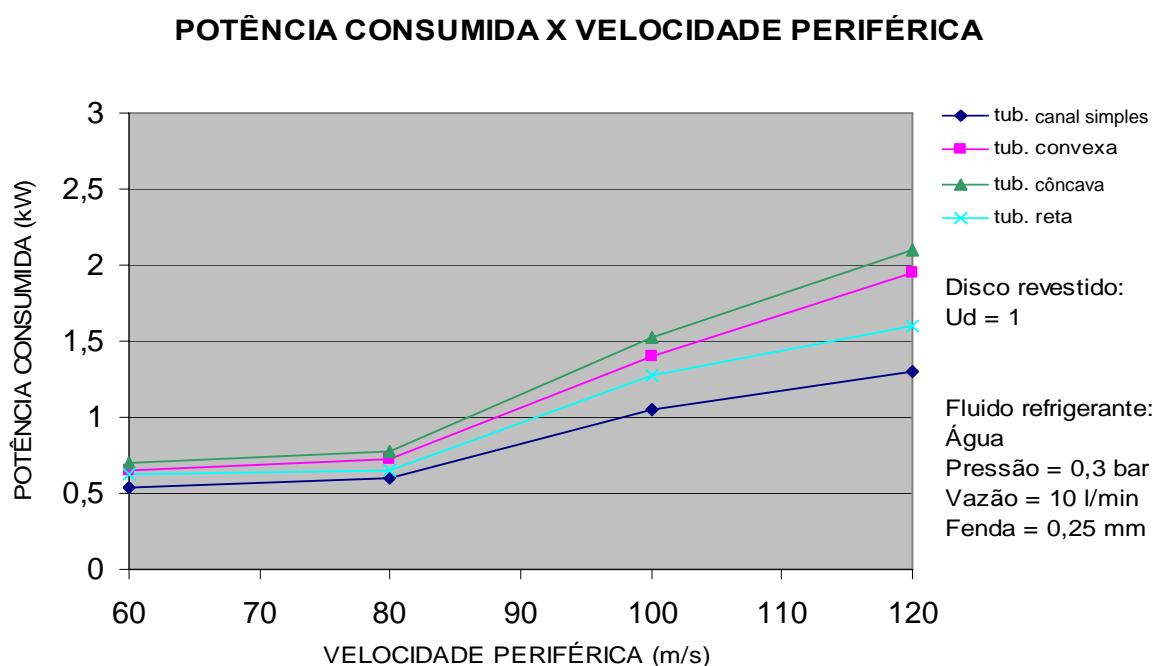


Figura 4.1 – Consumo de potência em função da velocidade periférica do rebolo.

A potência é consumida na aceleração do líquido ao ser bombeado pelo rebolo nas secções de interface tubeira rebolo.

Para velocidades periféricas de 60 a 80 m/s o consumo de potência para as quatro tubeiras analisadas não apresenta uma diferença significativa. A partir de 80 m/s para todas as tubeiras ensaiadas o consumo de potência apresenta diferença mais elevada e a diferença entre as potências consumidas para as quatro tubeiras apresenta valores significativos. Para velocidade periférica de 120 m/s a tubeira C côncava com três canais apresentou o maior consumo de potência (2,2 kW), a tubeira A de canal simples apresenta o menor consumo (1,3 kW), seguida pela tubeira B reta com três canais (1,6 kW) e a tubeira D convexa com três canais (1,9 kW). A diferença entre o maior consumo, tubeira C côncava com três canais, e o menor consumo, tubeira A de canal simples, é de 0,9 kW.

4.2 Influência da abertura da fenda entre rebolo e tubeira na potência consumida

O comportamento da potência consumida em função da abertura da fenda entre o rebolo e a tubeira para velocidades de 60m/s e 100m/s são mostrados nas Figuras 4.2 e 4.3.

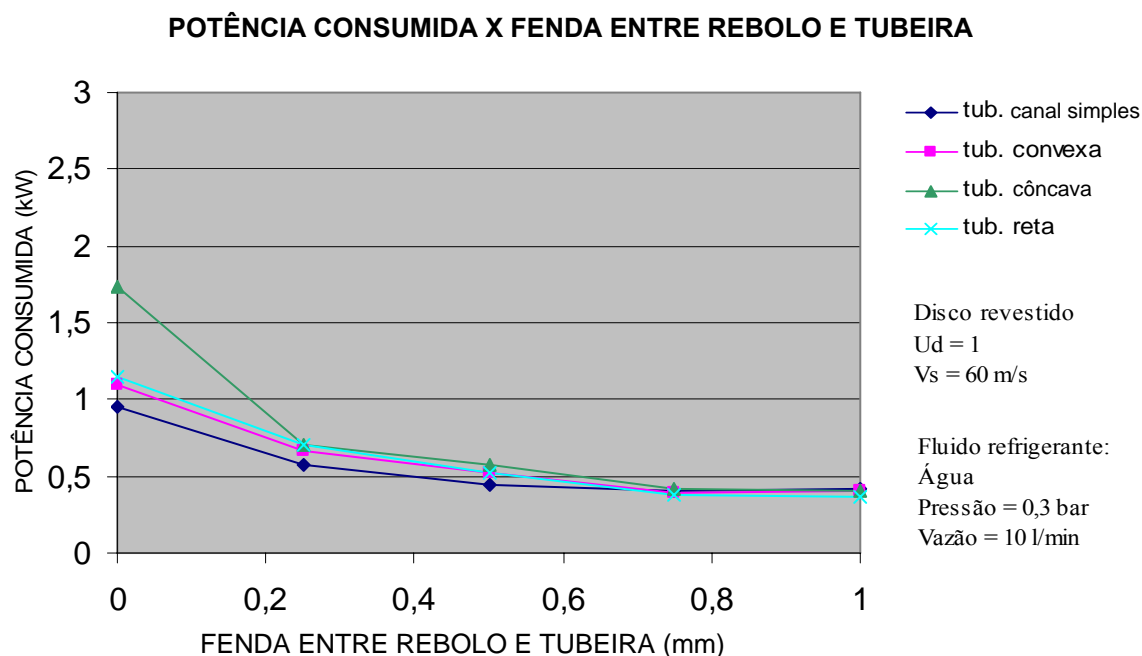


Figura 4.2 - Consumo de potência em função da fenda entre rebolo e tubeira para velocidade de 60 m/s.

Para as duas velocidades analisadas o aumento da abertura da fenda entre o rebolo e a tubeira leva a uma diminuição da potência consumida. Com a diminuição da abertura da fenda entre rebolo e tubeira os grãos protusos do rebolo bombeiam o fluido com maior eficiência, aumentando a velocidade do fluido na interface rebolo tubeira.

Para velocidade de 60 m/s a tubeira C côncava com três canais apresentou o maior consumo quando a abertura da fenda é reduzida para zero. A tubeira A de canal simples apresentou o menor consumo de potência para fendas menores, seguida pela tubeira B reta com três canais. O mesmo comportamento também é observado para a velocidade de 100 m/s.

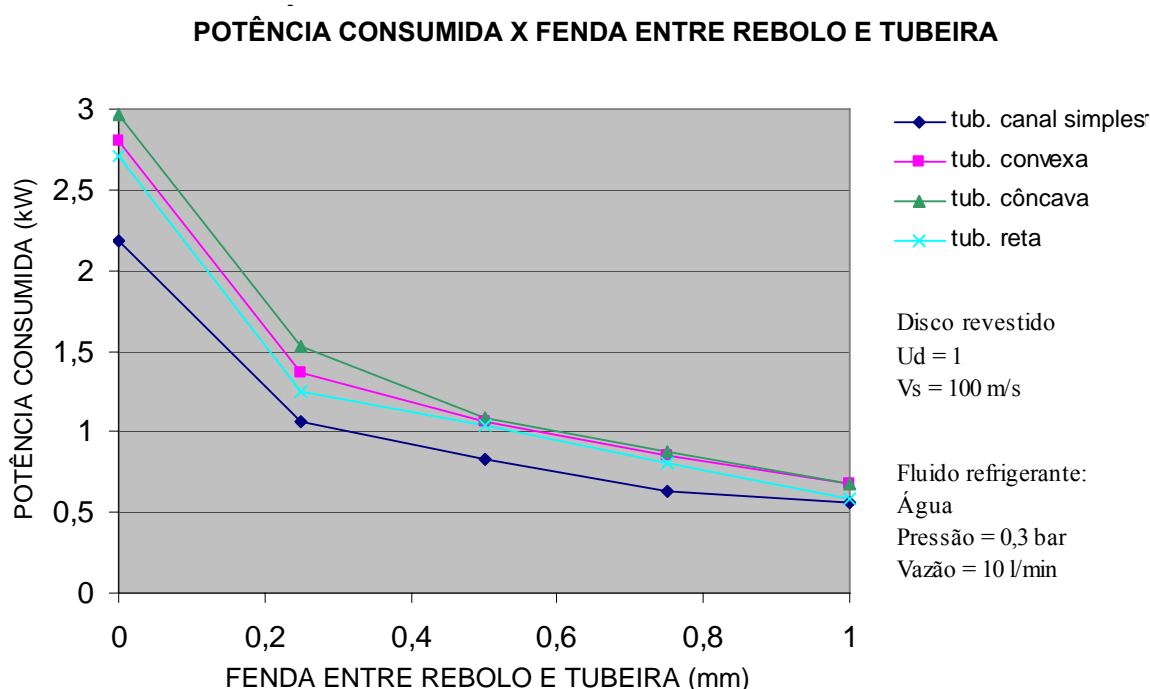


Figura 4.3 - Consumo de potência em função da fenda entre rebolo e tubeira para velocidade de 100 m/s.

4.3 Influência da vazão do fluido lubri-refrigerante na potência consumida

O aumento da vazão do fluido lubri-refrigerante leva a um aumento na potência consumida para todas as tubeiras ensaiadas, como mostram as Figuras 4.4 e 4.5. Pelo aumento da vazão os poros do rebolo são mais bem preenchidos, aumentando a quantidade de fluido que é efetivamente acelerada na interface entre rebolo e tubeira com abertura constante. O menor consumo de potência foi verificado para a tubeira A de canal simples, tanto para a

velocidade de 60 m/s, como também para a velocidade de 100 m/s. A diferença entre a maior e a menor potência consumida para as diferentes tubeiras foi inferior a 1 kW.

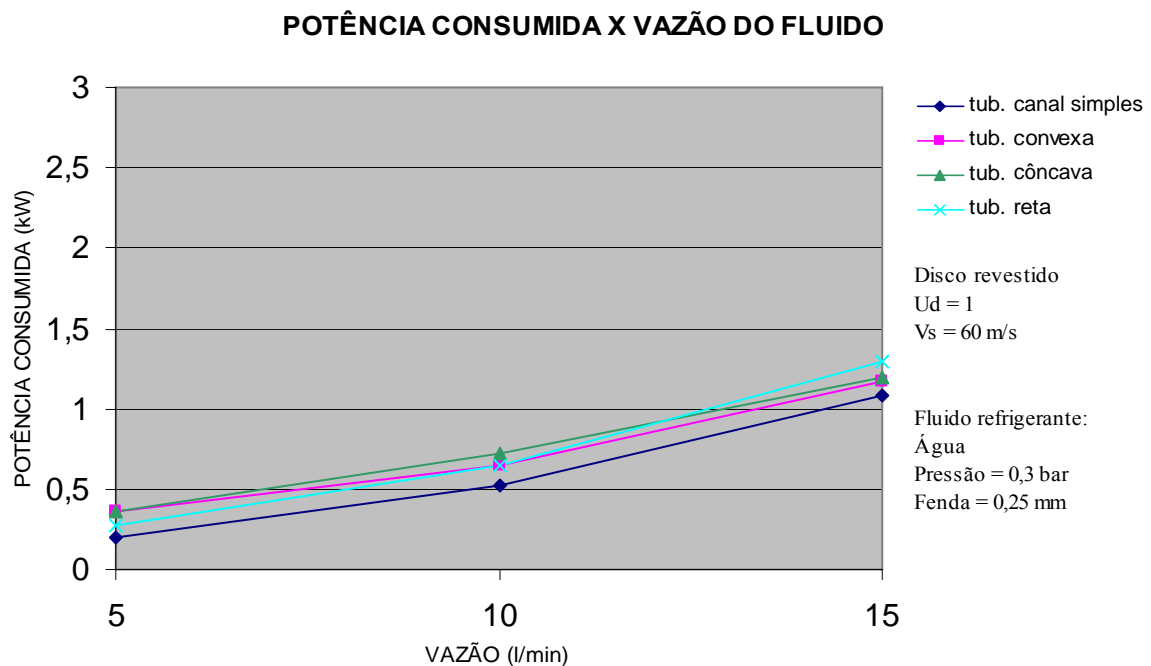


Figura 4.4 - Consumo de potência em função da vazão do fluido para $v_s = 60$ m/s.

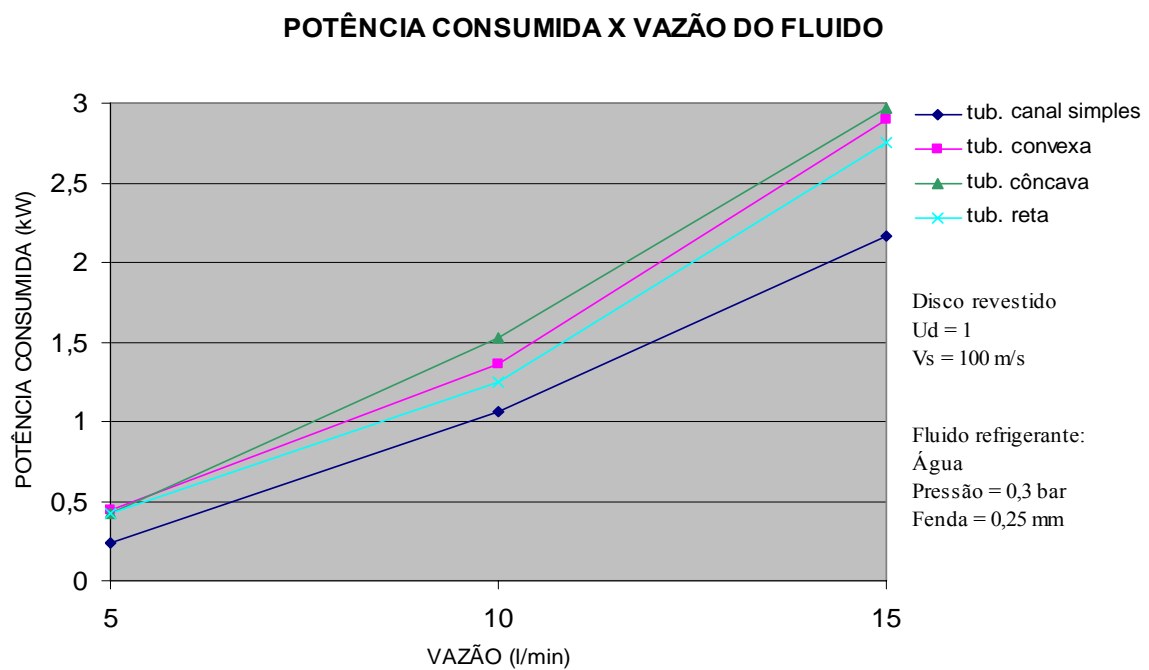


Figura 4.5 - Consumo de potência em função da vazão do fluido para $v_s = 100$ m/s.

4.4 Influência da topografia do rebolo na potência consumida

Constatou-se que a topografia do rebolo tem uma influência pequena sobre o consumo de potência no emprego de tubeiras do tipo lésbica na retificação, (Fig. 4.6).

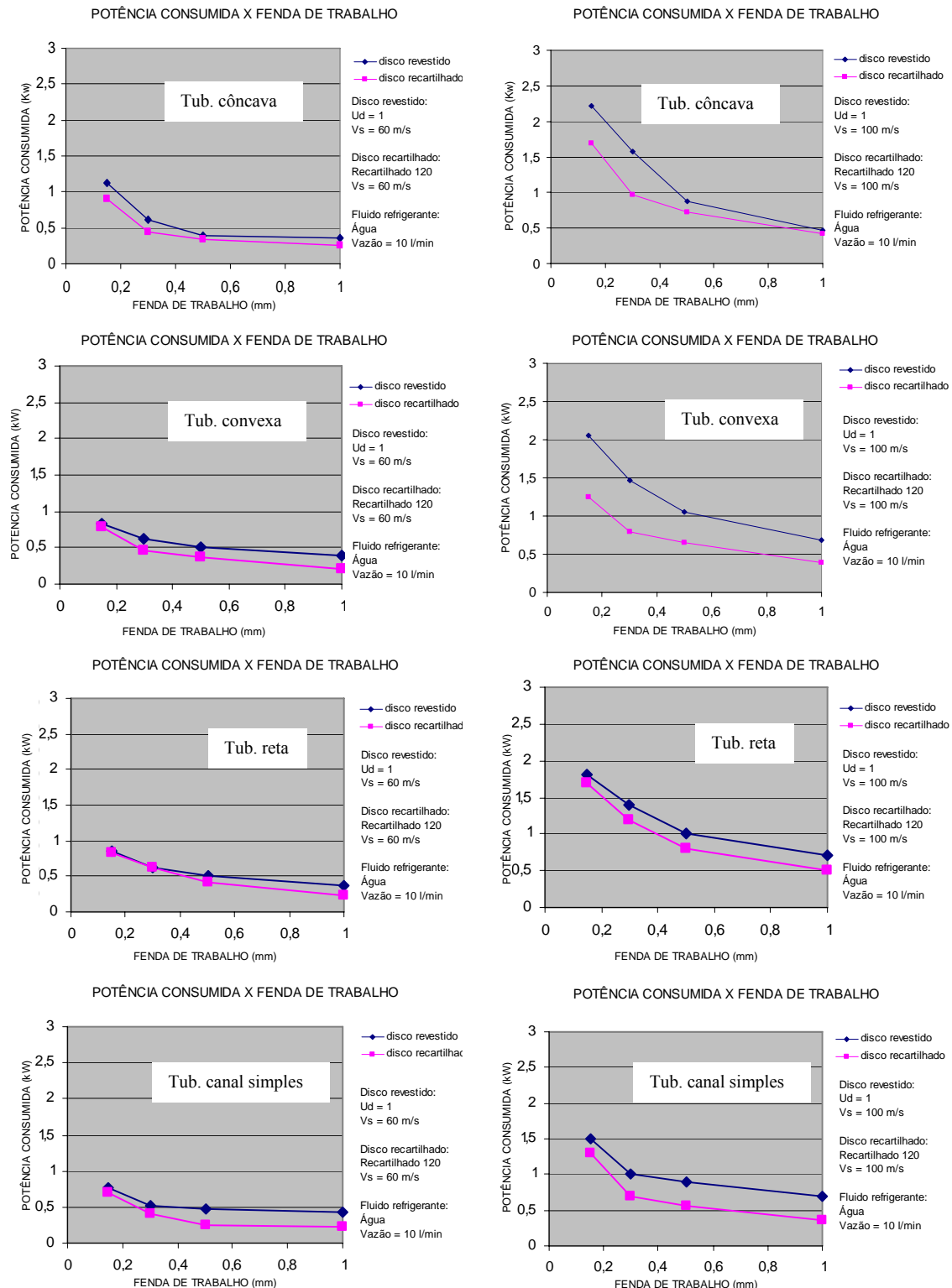


Figura 4.6 – Consumo de potência em função da abertura da fenda entre rebolo e tubeira para as tubeiras analisadas, usando um rebolo e um disco de alumínio recartilhado.

Os gráficos da Figura 4.6 mostram o consumo de potência para 60 e 100 m/s (coluna esquerda e direita respectivamente). Tanto para o rebolo como para o disco recartilhado a potência consumida diminui com o aumento da abertura entre o rebolo e a tubeira. O disco recartilhado mostrou um consumo de potência menor para todos os ensaios. A regularidade da topografia obtida no recartilhamento e o maior volume de poros entre os picos obtidos no recartilhamento, dificultam a aceleração do fluido. No rebolo os poros são mais fechados e a protusão é menor, fazendo com que o fluido seja acelerado de forma mais eficiente. Para ambos os ensaios a potência é elevada para aberturas pequenas da fenda entre rebolo e tubeira.

Analisando, por exemplo, o consumo de potência para a tubeira C côncava com três canais, fenda 0,25 mm, velocidade periférica do rebolo 100 m/s e vazão 10 l/min usando um disco revestido vamos encontrar 1,6 kW de consumo (gráfico da figura 4.6 – tub. côncava), já para o disco recartilhado o consumo de potência é de 0,95 kW significando uma diferença de consumo de 0,65 kW.

4.5 Análise do escoamento do fluido

O escoamento do fluido no interior do corpo das tubeiras foi analisado com ferramentas da simulação numérica com código computacional *CFX 5.7* (Ansys Inc., 2004). Numa segunda etapa o escoamento do fluido com particulados de purpurina (glitter) no interior de tubeiras fabricadas em acrílico transparente foi filmado com uma câmara de alta velocidade.

Os resultados obtidos na simulação numérica mostram regiões turbulentas na entrada e na saída do fluido nas tubeiras. A diminuição da intensidade da cor mostra um aumento da velocidade do escoamento da entrada para a saída das tubeiras (Fig. 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10).

A simulação do escoamento para a tubeira A de canal simples apresenta perturbação no escoamento do fluido ao longo de toda a extensão da tubeira, que aumentou na região junto ao rebolo (Fig. 4.7). A figura mostra o interior da tubeira com um único canal onde as linhas de fluxos são visualizadas. As linhas coloridas representam o fluxo do fluido que na tubeira A de canal simples aparecem em forma de espirais do início ao fim da tubeira, indicando turbilhonamento do fluido. A mudança na intensidade das cores das linhas representa uma variação na velocidade do fluido, as cores escuras representam velocidade baixa, as cores claras representam velocidades altas, logo nesta tubeira a velocidade do fluido é aumentada da

entrada da tubeira para a saída mostrando o efeito de arraste que o rebolo exerce sobre o fluido, principalmente na região de saída do fluido da tubeira.

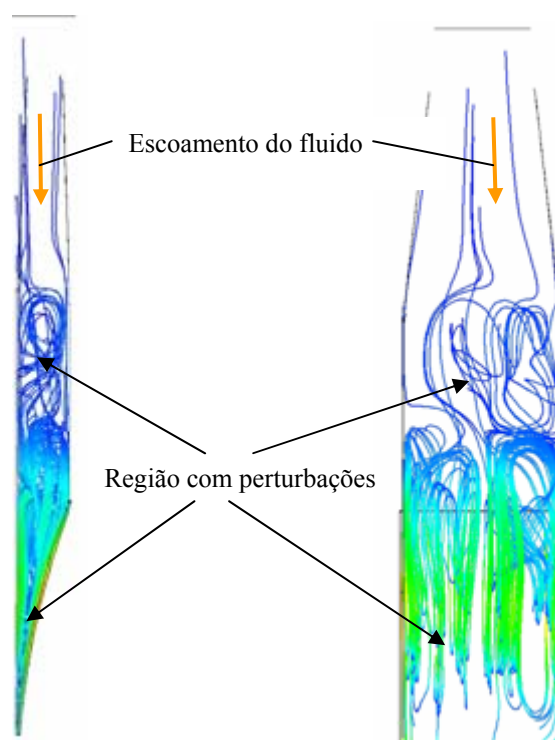


Figura 4.7 – Simulação numérica do escoamento do fluido na tubeira A de canal simples, velocidade 100 m/s, fenda 0,5 mm, vazão 10 l/min.

O aumento da velocidade periférica do rebolo leva ao aumento da turbulência na região próxima à saída do fluido (Fig. 4.8). A Figura mostra o interior da tubeira B reta com três canais, abertura da fenda 0,5 mm, vazão 10 l/min com variação da velocidade periférica de 60 m/s para 100 m/s onde as linhas de fluxos são visualizadas. Na tubeira B reta com três canais as linhas de fluxo aparecem em forma de espirais na entrada e no final dos canais indicando turbilhonamento do fluido. Ao longo de toda a extensão dos canais não é possível visualizar as linhas espiraladas indicando um comportamento laminar do fluido. Nesta tubeira também é possível visualizar a mudança na tonalidade das cores das linhas que representam o fluxo do fluido, indicando um aumento da velocidade do líquido quando se aproxima do rebolo. As linhas de fluxo visualizadas na Figura 4.8 (lado esquerdo) foram obtidas para velocidade de 60 m/s, as linhas espirais aparecem com mais intensidade no canal c3 quando comparado com os canais c1 e c2. Nesta região dos canais também é possível distinguir uma tonalidade diferente na cor das linhas de fluxo, quando comparamos o canal c3 com os dois outros verificamos que a tonalidade da cor é mais clara neste canal indicando que o fluido

possui uma velocidade maior. Analisando a variação da velocidade verificamos que para 100 m/s as linhas de fluxo em forma de espirais são mais abertas indicando uma turbulência maior do fluido na região junto ao rebolo.

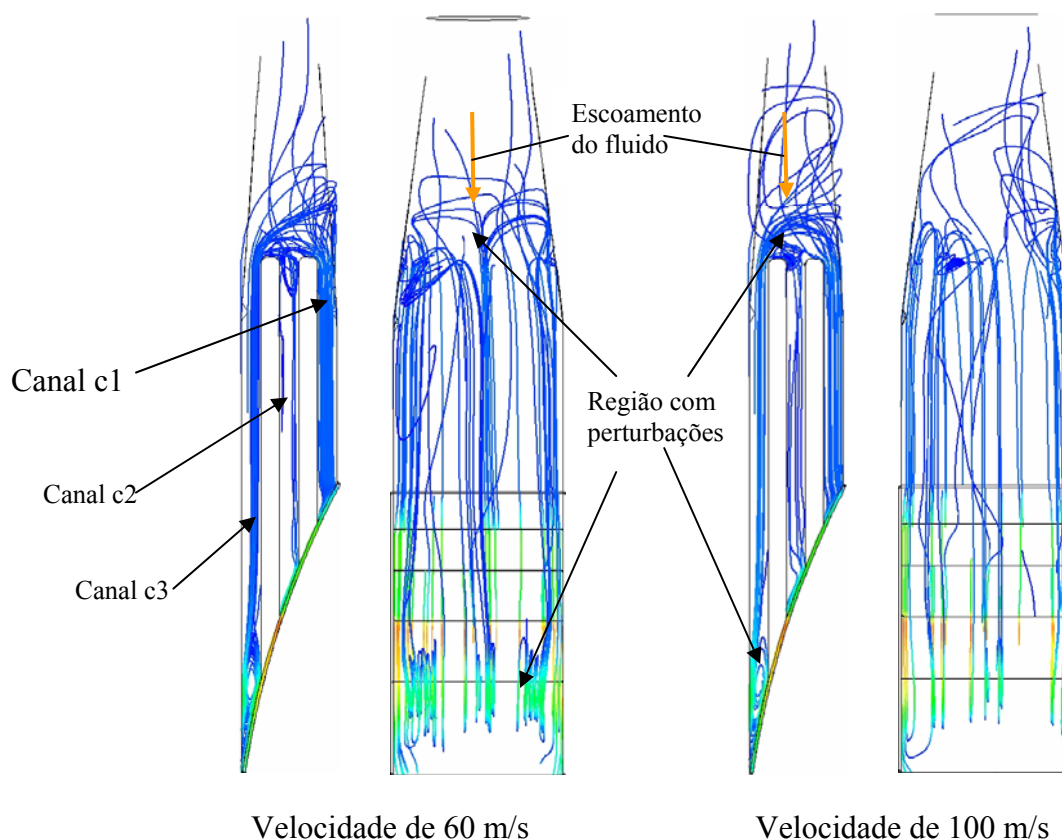


Figura 4.8 – Simulação numérica do escoamento do fluido na tubeira B reta com três canais, fenda 0,5 mm, vazão 10 l/min.

O comportamento no fluido na tubeira C côncava (Fig. 4.9) e da tubeira D convexa (Fig. 4.10) assemelha-se ao da tubeira B reta com três canais.

Analisando a tubeira D convexa quando a variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira é diminuída de 1,0 mm para 0,5 mm é possível identificar um aumento na perturbação do escoamento junto ao rebolo com a diminuição da abertura entre o rebolo e a tubeira. Esta perturbação é visualizada pelas espirais da linha de fluxo mais abertas na região junto ao rebolo.

Os resultados das simulações mostraram que a perturbação maior no escoamento do fluido no interior das tubeiras se concentra na entrada e próximo à saída do fluido na interface tubeira rebolo. As regiões escolhidas para as filmagens foram à região onde se iniciam os canais e a região próxima ao rebolo.

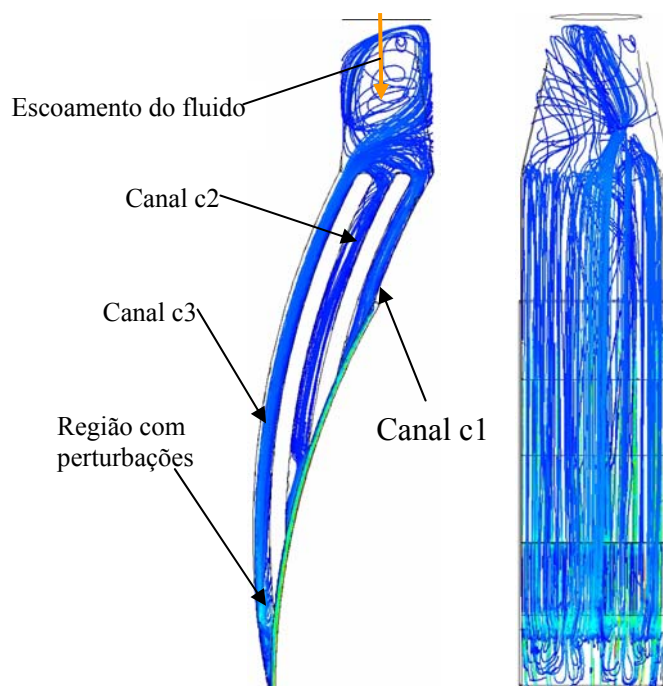


Figura 4.9 – Simulação numérica do escoamento do fluido na tubeira C côncava com três canais, velocidade 100 m/s, fenda 1,0 mm, vazão 10 l/min.

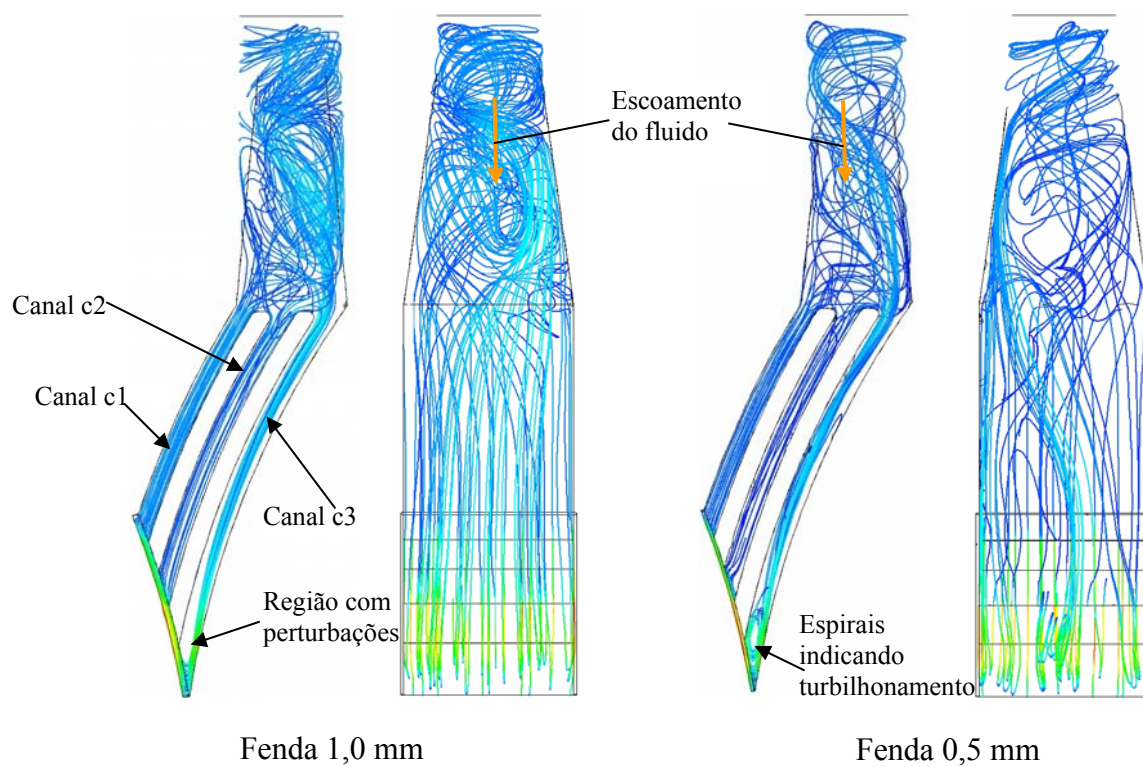


Figura 4.10 – Simulação numérica do escoamento do fluido na tubeira D convexa com três canais, velocidade 100 m/s, vazão 10 l/min e fenda variável.

O movimento do rebolo mostrou ter uma forte influência no jato de fluido que passa pela tubeira. As Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 mostram o jato formado na saída da tubeira para velocidades periféricas do rebolo entre 60 e 120 m/s. Os resultados obtidos nestes ensaios mostram que o aumento da velocidade periférica do rebolo aumenta a intensidade do espraie do fluido que sai da tubeira indicando um aumento de velocidade do fluido. Na figura à esquerda a tubeira ainda está afastada do rebolo e pode ser observada a influência do colchão de ar que se forma em torno do rebolo, forçando o fluido a escoar acompanhando a curvatura da tubeira, e não caindo em queda livre. À medida que a tubeira é aproximado ao rebolo o efeito do colchão de ar diminui e o fluido passa a ser acelerado pelo rebolo. Para todas as tubeiras a aproximação do rebolo na tubeira (fenda 0,25 mm) força o contato do líquido com o rebolo indicando um aumento na velocidade do líquido.

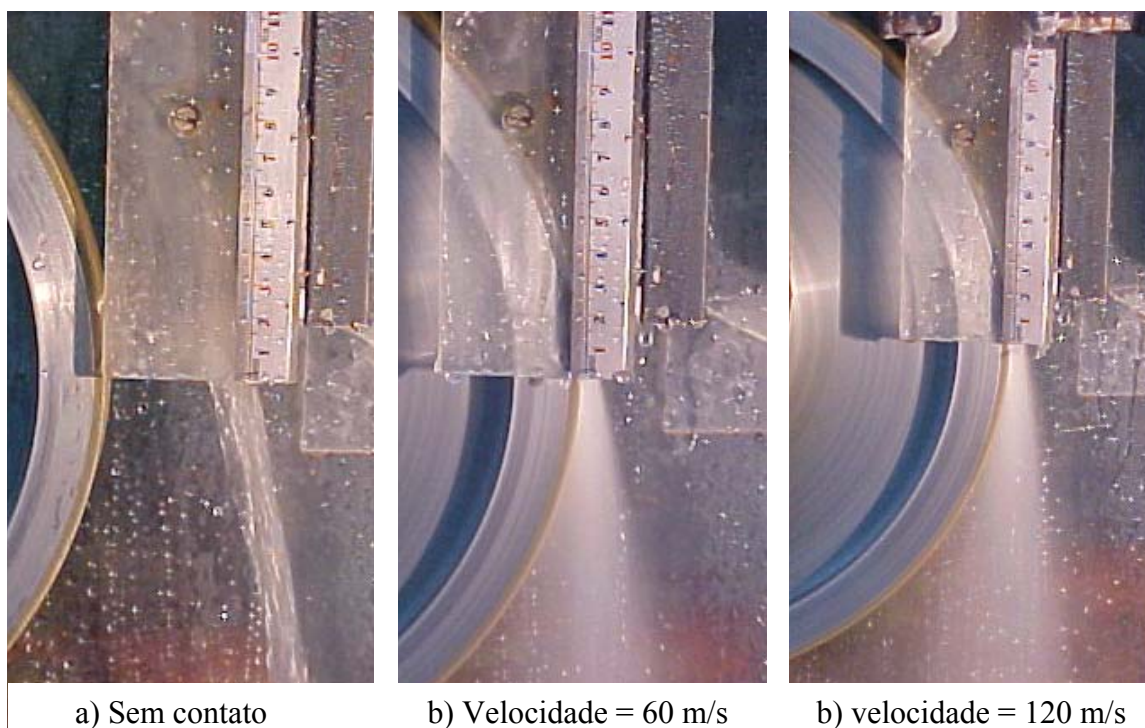


Figura 4.11 – Influência da abertura da fenda entre tubeira e rebolo e a velocidade periférica do rebolo sobre o comportamento do escoamento do fluido na saída da tubeira A tipo sapata De canal simples.

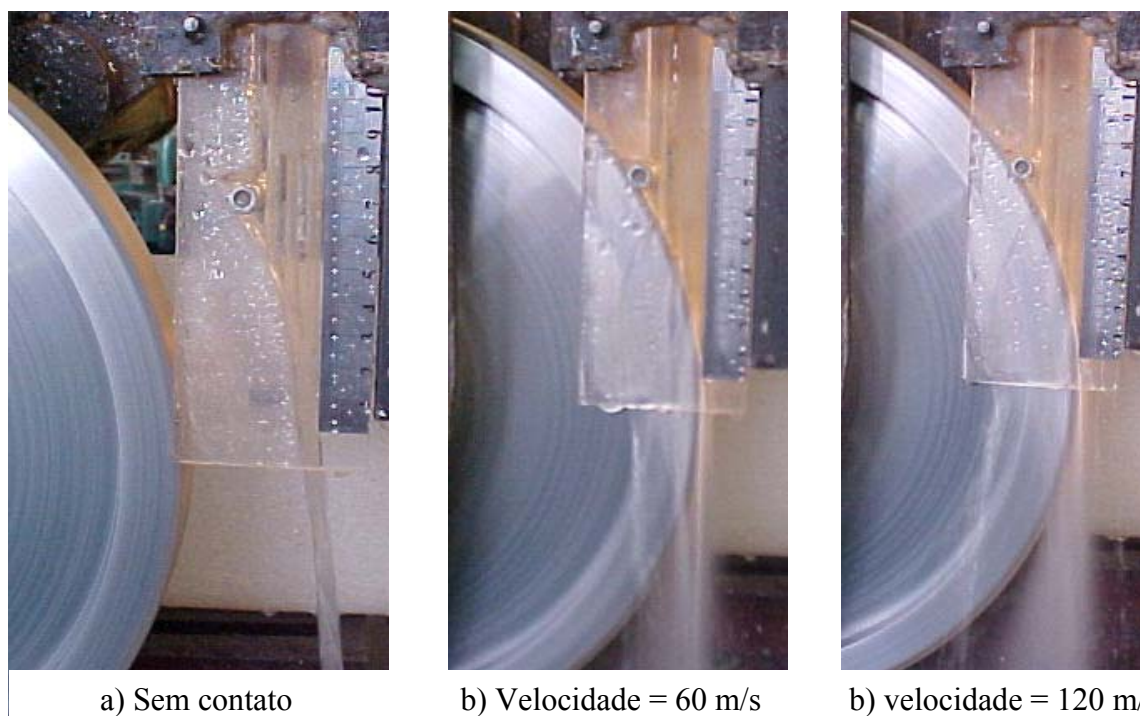


Figura 4.12 – Influência da abertura da fenda entre tubeira e rebolo e a velocidade periférica do rebolo sobre o comportamento do escoamento do fluido na saída da tubeira B tipo sapata reta com três canais.

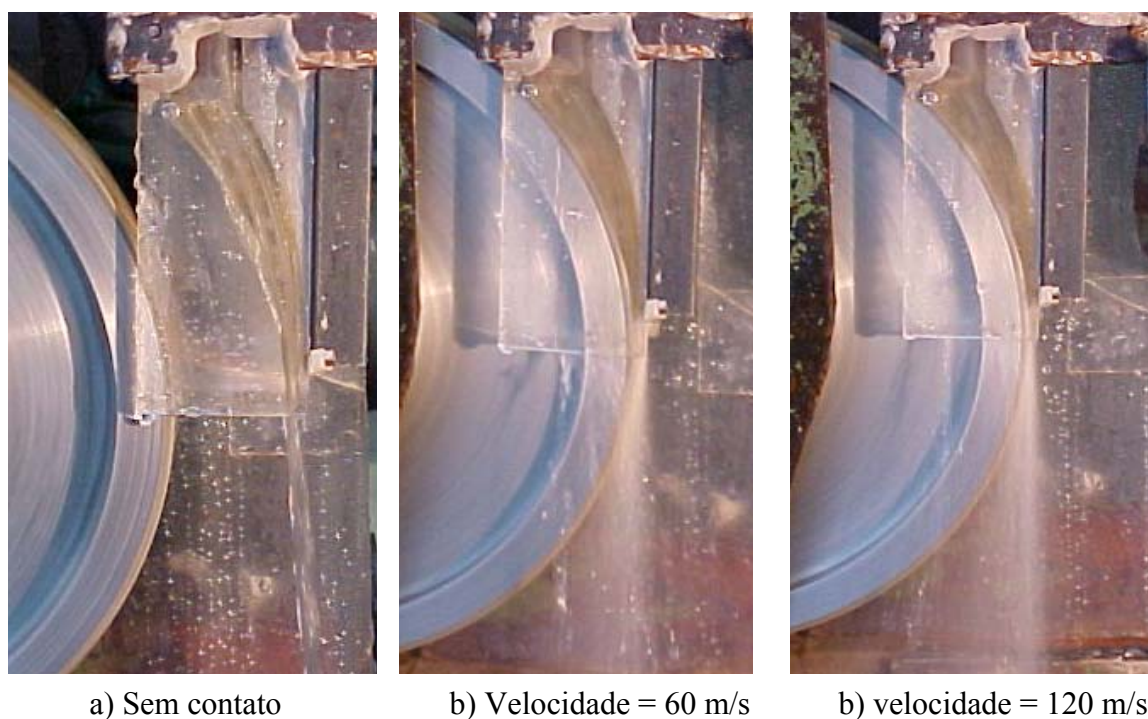


Figura 4.13 – Influência da abertura da fenda entre tubeira e rebolo e a velocidade periférica do rebolo sobre o comportamento do escoamento do fluido na saída da tubeira C tipo sapata côncava com três canais.

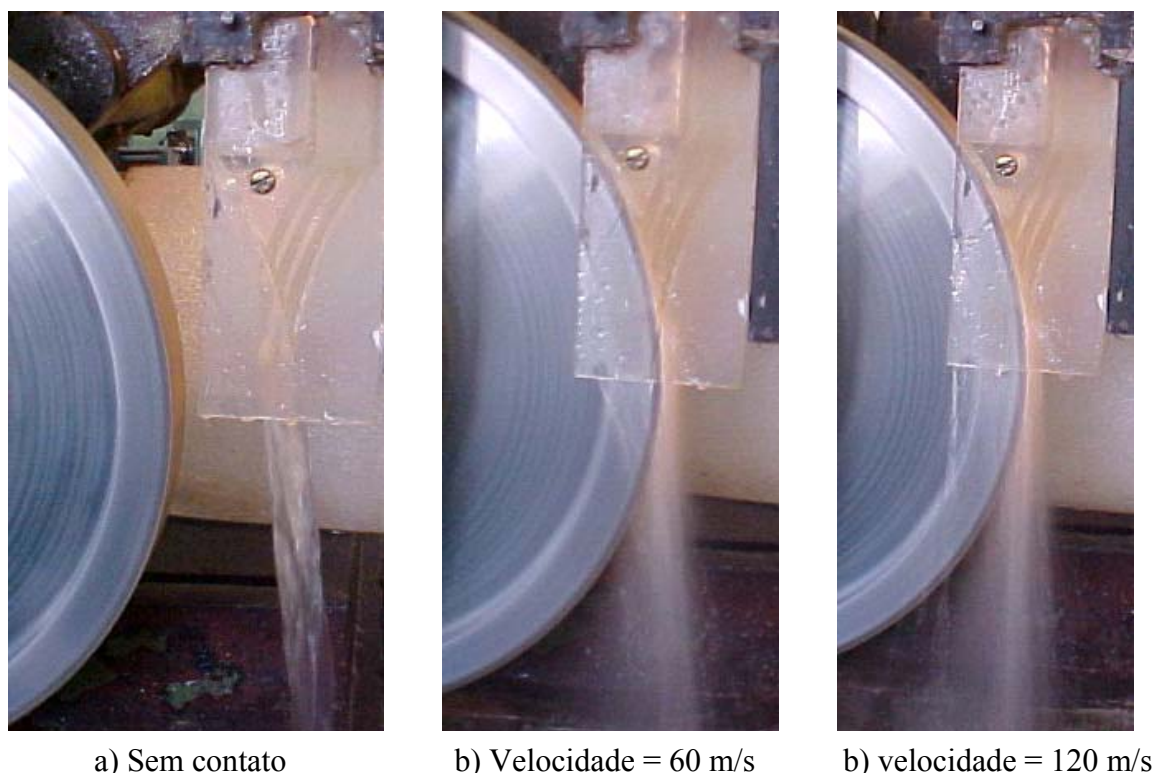


Figura 4.14 – Influência da abertura da fenda entre tubeira e rebolo e a velocidade periférica do rebolo sobre o comportamento do escoamento do fluido na saída da tubeira D tipo sapata convexa com três canais.

4.5.1 Escoamento do fluido no interior das tubeiras

Na entrada dos canais e na região junto ao rebolo é observado na tubeira uma forte turbulência com flutuações de pressão tão acentuadas que levam a formação de bolhas de cavitação no fluxo. Esta afirmação é possível com base nos resultados obtidos na simulação numérica e nos filmes realizados do interior das tubeiras nessas regiões, as oscilações de pressão podem ser explicadas pelo aumento da velocidade de escoamento do fluido quando este entra em contato com o rebolo e é acelerado para a velocidade tangencial do mesmo.

Dieter Thoma determinou um número adimensional característico para cavitação, mais tarde denominado de fator de Thoma, ou fator de cavitação.

O fator de Thoma (σ) ou número de Thoma (Batchelor, 2000) é expresso pela equação 4.1.

$$\sigma = \frac{P_o - P_{sat}}{\frac{1}{2} \times \rho \times v_s^2} \quad 4.1$$

Onde: P_o pressão absoluta num ponto próximo da zona de cavitação (pressão de referência);

P_{sat} pressão de saturação do vapor do líquido a temperatura ambiente;

v_s Velocidade do líquido junto ao rebolo (velocidade periférica do rebolo);

ρ massa específica.

Para uma pressão de alimentação de P_o de 40.000 N/m², verificou-se uma vazão de 10 l/min no escoamento para uma fenda de 0,15 mm e 28 mm de largura do rebolo, representado uma velocidade de escoamento média de aproximadamente 40 m/s na fenda. Se o rebolo apresentar uma velocidade periférica inferior à velocidade de escoamento do fluido na fenda, ele funcionará como um desacelerador do escoamento aumentando a pressão do líquido bombeado e não pode ocorrer cavitação. Se aumentarmos a velocidade periférica do rebolo para velocidades maiores que 40 m/s, para a mesma pressão de alimentação, então para uma pressão de saturação de 2.390 N/m² à 20° C, densidade da água de 1.000 kg/m³, podemos determinar a velocidade para a qual inicia a cavitação no escoamento, Número de Thoma limite. Se calcularmos o número de Thoma para uma velocidade periférica do rebolo de 100 m/s, representando um aumento da velocidade de 60 m/s na fenda, obtém $\sigma = 2,1 \times 10^{-2}$, indicando a presença de vapor de cavitação na fenda, Fig. 4.15 (filme 1 do CD que acompanha esta tese) da tubeira B reta com três canais. A Figura mostra a tubeira B reta com três canais, nela é indicada a região onde acontecem as bolhas de cavitação, no filme 1 do CD anexo é possível visualizar as bolhas de cavitação indicada na Figura. Um aumento na abertura da fenda bem como um aumento da pressão de alimentação deve diminuir a presença de bolhas de cavitação.

Analisando a região de entrada das tubeiras com canais constata-se que as nervuras que dividem o fluxo do fluido levam a perturbação do fluxo. Na região do duto com as aletas estabilizadoras o fluxo se torna quase laminar.

O aumento da fenda entre rebolo e tubeira diminui a eficiência de bombeamento do fluido na direção da peça e assim também a velocidade média do escoamento. Para um aumento demasiado da fenda o colchão de ar que se forma em torno do rebolo não é mais eliminado pela sapata e inicia o arraste de ar para a fenda entre a tubeira e o rebolo.

A topografia do rebolo tem influência sobre o efeito de bombeamento do fluido na fenda entre a sapata e o rebolo. A topografia é determinada pela porosidade e pela rugosidade

Rts (decorrente do dressamento do rebolo). Uma maior quantidade bem como poros maiores do rebolo e uma topografia mais agressiva leva a um bombeamento mais eficiente do fluido.

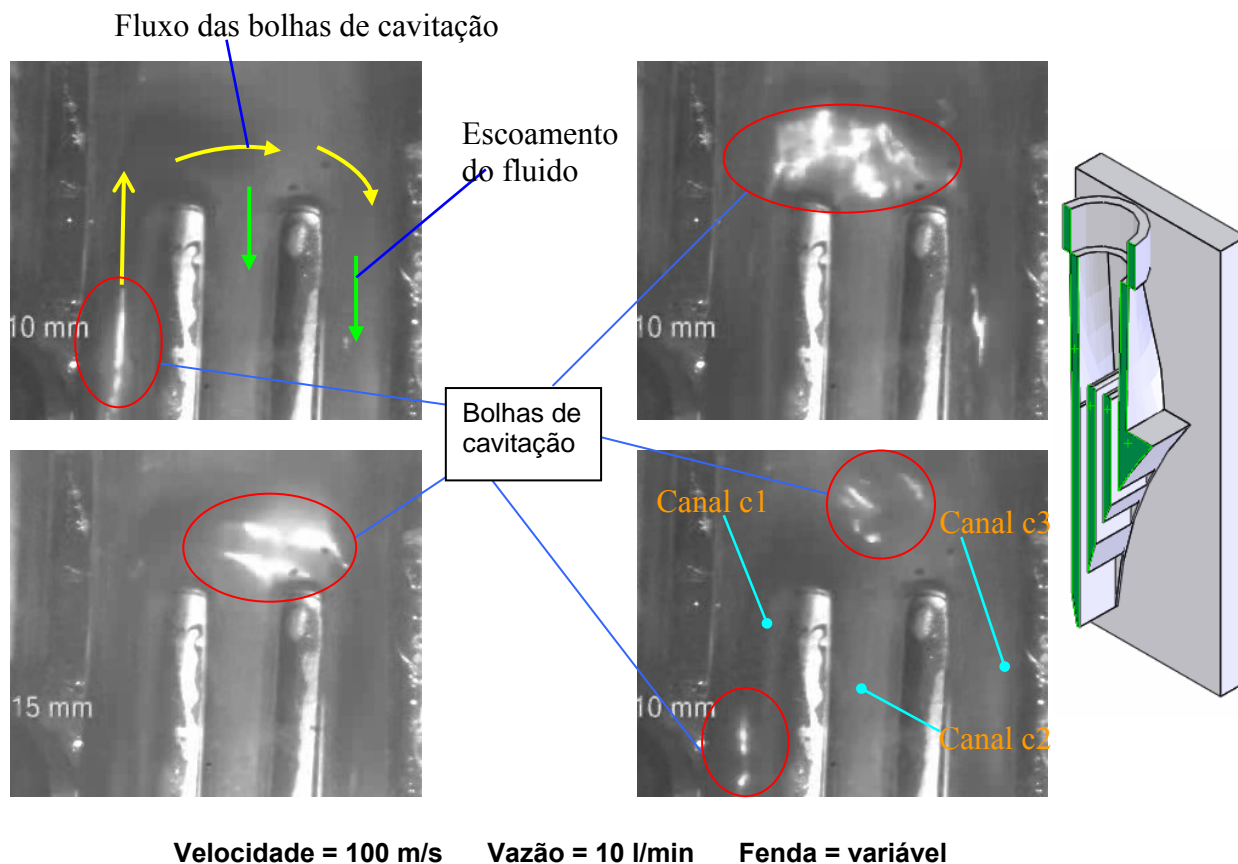


Figura 4.15 – Escoamento do fluido na região de entrada da tubeira B reta com três canais para fenda variável (filme 1 do CD anexo)

O escoamento dentro do corpo da tubeira A reta de canal simples, com abertura da fenda entre rebolo e tubeira 0,10 mm, vazão do fluido de 10 l/min e velocidade periférica do rebolo de 100 m/s é mostrado na Figura 4.16 (filme 2 do CD anexo). A Figura mostra a tubeira A reta de canal simples, nela é indicado à região onde acontecem as bolhas de cavitação e as regiões com perturbações no fluxo do fluido, no filme 2 do CD anexo é possível visualizar as bolhas de cavitação indicada na Figura assim como as regiões com perturbações.

O escoamento do fluido dentro da tubeira próximo à superfície do rebolo comprova a simulação numérica (Fig. 4.7), mostrando fortes perturbações no escoamento do fluido.

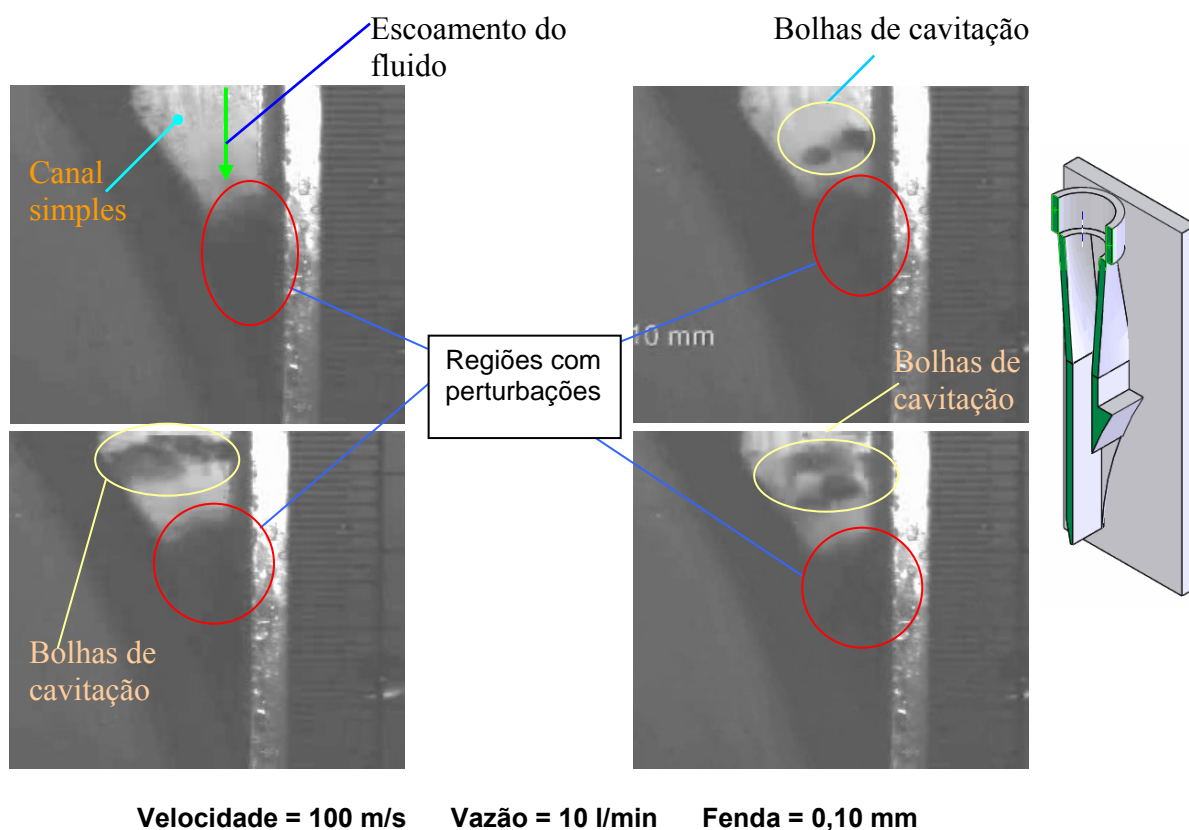


Figura 4.16 – Escoamento do fluido no interior da tubeira A reta de canal simples para velocidade periférica de 100 m/s e fenda de 0,10 mm (filme 2 do CD anexo).

A presença das nervuras que dividem o fluxo do fluido no interior das tubeiras leva a perturbação do fluxo do fluido, Fig. 4.17 (filme 3 do CD anexo).

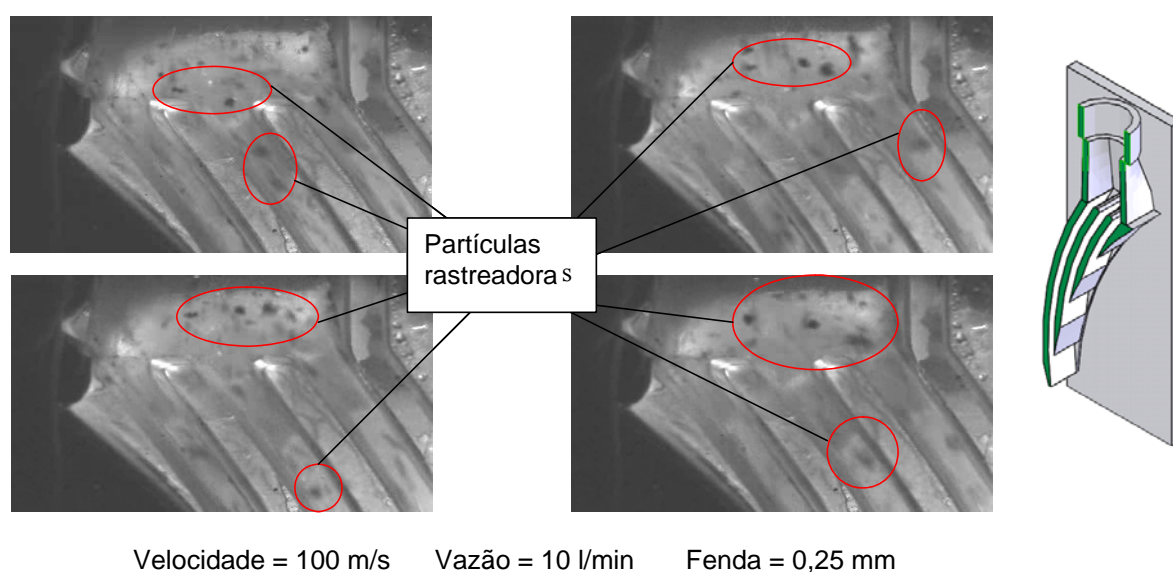


Figura 4.17 – Influência das nervuras direcionais sobre o fluxo do fluido no interior da tubeira C, côncava com três canais (filme 3 do CD anexo).

A Figura 4.17 mostra a tubeira C côncava com três canais indicando o fluxo das partículas rastreadoras, no filme 3 do CD anexo é possível visualizar o fluxo das partículas rastreadoras indicado na Figura.

Na entrada da tubeira é observada uma forte turbulência com flutuações de pressão tão acentuadas que levam a formação de bolhas de cavitação no fluxo. As partículas rastreadoras acompanham estas turbulências e permitem sua visualização. Na região do duto com as aletas estabilizadoras o fluxo se torna quase laminar, não se percebendo perturbações nas trajetórias das partículas rastreadoras, comprovando a simulação numérica.

A Figura 4.18, (filme 4 do CD anexo), indica as regiões na tubeira C côncava com três canais onde surgem as bolhas de cavitação. O filme 4 do CD anexo mostra o escoamento do fluido sem a utilização de partículas rastreadoras no corpo da tubeira C côncava com três canais.

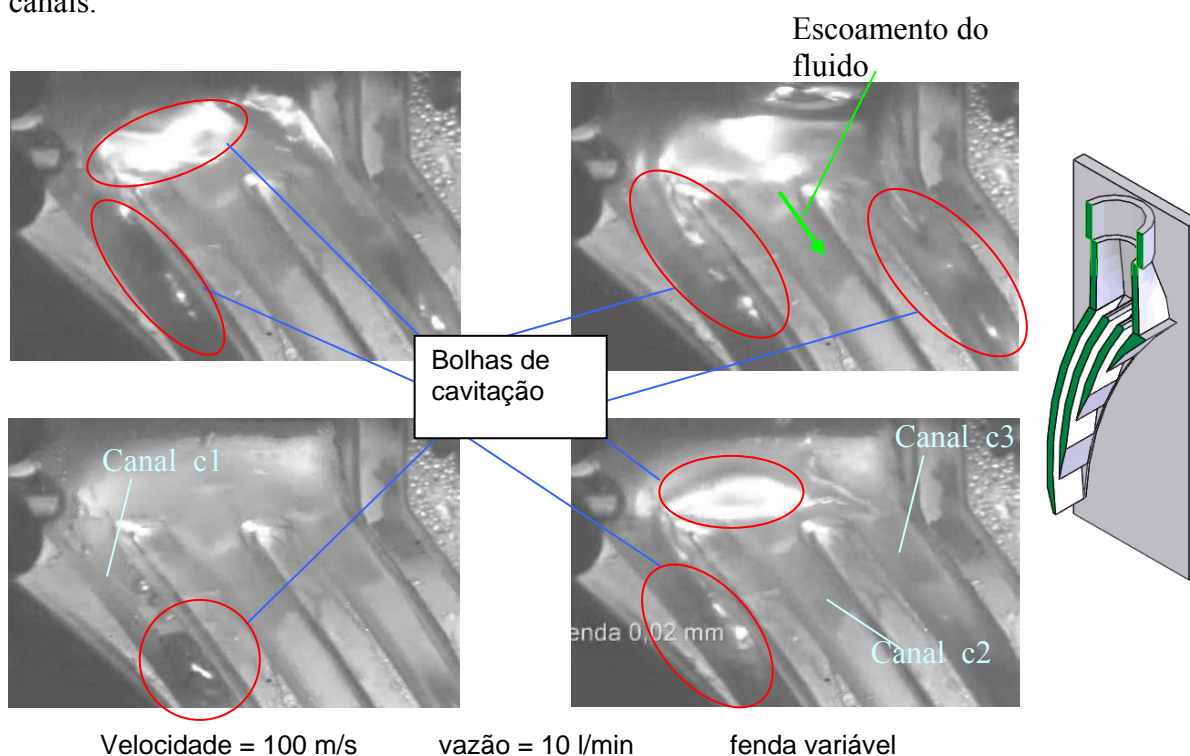


Figura 4.18 – Escoamento do fluido na região de entrada da tubeira C côncava com três canais com fenda variável (filme 4 do CD anexo)

Para a velocidade periférica do rebolo de 100 m/s, uma abertura da fenda inferior a 0,10 mm e pressão de alimentação do fluido de 40.000 N/m² surgem bolhas de cavitação no escoamento ($\sigma = 4,6 \times 10^{-2}$). O fluido entra em ebulição no canal c1 (na parte esquerda da figura) acompanha a turbulência e escoar pelo canal c3 à direita na figura. A presença de bolhas de cavitação no fluxo do fluido bombeado pela tubeira revela as fortes oscilações de

pressão que ocorrem no interior da tubeira. Estas oscilações de pressão são causadas pela sucção provocada pelo rebolo quando este entra em contato com o fluido.

Um aumento da fenda entre rebolo e sapata, no entanto, diminui a eficiência do fluxo de fluido de corte na direção da peça e aumenta o arraste de ar entre a sapata e o rebolo.

Na tubeira D convexa com três canais, Fig. 4.19 (filme 5 do CD anexo) que indica a nas mesmas condições da tubeira C côncava a existência de bolhas de cavitação. No filme 5 do CD anexo é possível visualizar o fluxo das bolhas de cavitação.

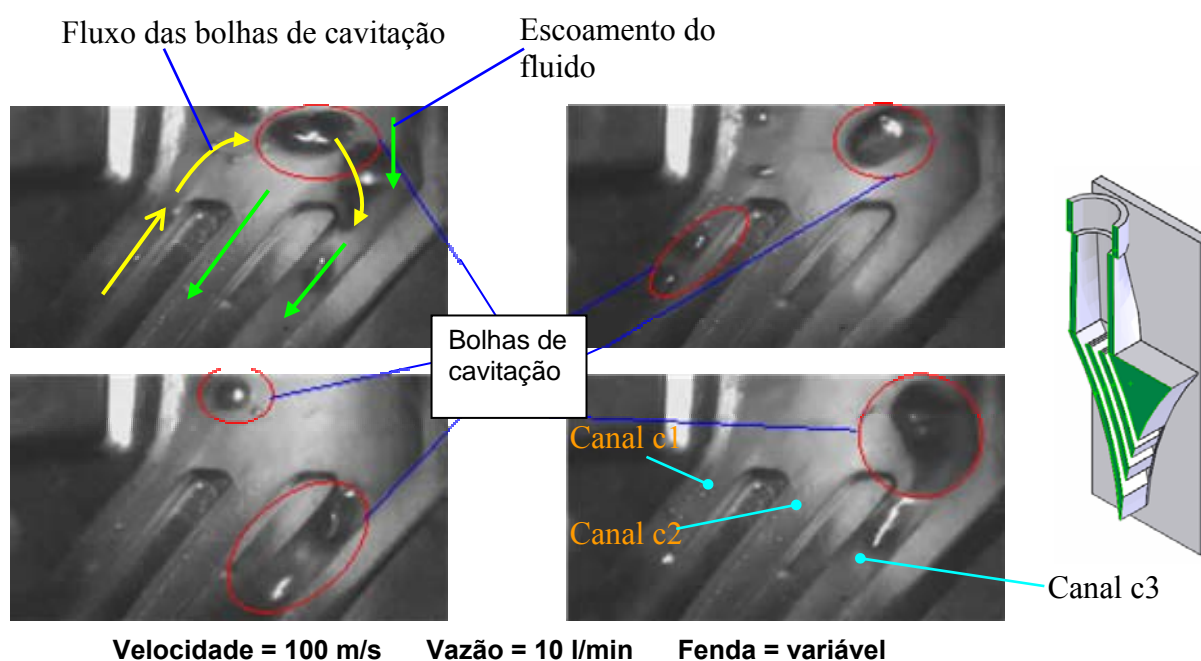


Figura 4.19 – Escoamento do fluido na região de entrada da tubeira D convexa com três canais para fenda variável (filme 5 do CD anexo).

Para velocidades periféricas do rebolo de 60 m/s, uma abertura da fenda entre rebolo e sapata de 0,25 mm e pressão de alimentação do fluido de 30.000 N/m² ($\sigma = 4,3 \times 10^{-2}$), não são observadas bolhas de cavitação e não é observado o arraste de ar entre o rebolo e a sapata. Aumentando a velocidade periférica do rebolo para 120 m/s ($\sigma = 0,6 \times 10^{-2}$), é observada a formação de bolhas de cavitação no interior da tubeira C côncava de três canais (filme 6 do CD anexo). Para as mesmas condições, na tubeira B reta com três canais e a tubeira D convexa com três canais as bolhas de cavitação não são visualizadas (filme 7 e 8 do CD anexo).

Aumentando a vazão do fluido de 5 até 15 l/min, velocidade periférica do rebolo de 100 m/s e fenda de 0,25 mm, não foi verificada qualquer perturbação do fluxo do fluido no interior do corpo das tubeiras, (filme 9, 10 e 11 do CD anexo).

4.5.2 Influência da velocidade periférica do rebolo sobre o escoamento do fluido no interior da tubeira.

Na Figura 4.20 (filme 12 do CD anexo) mostra o interior da tubeira A próximo ao rebolo. Nesta Figura é possível identificar a região onde surge a entrada de ar e a região com perturbações. O filme 12 do CD anexo mostra o fluxo do fluido com variação da velocidade do rebolo. Para uma abertura da fenda entre rebolo e tubeira de 0,25 mm e vazão de 10 l/min, o aumento da velocidade periférica do rebolo aumenta a perturbação do fluido apenas próximo à superfície do rebolo. Para velocidade de 120 m/s observa-se que o rebolo passa a arrastar ar para a interface tubeira - rebolo.

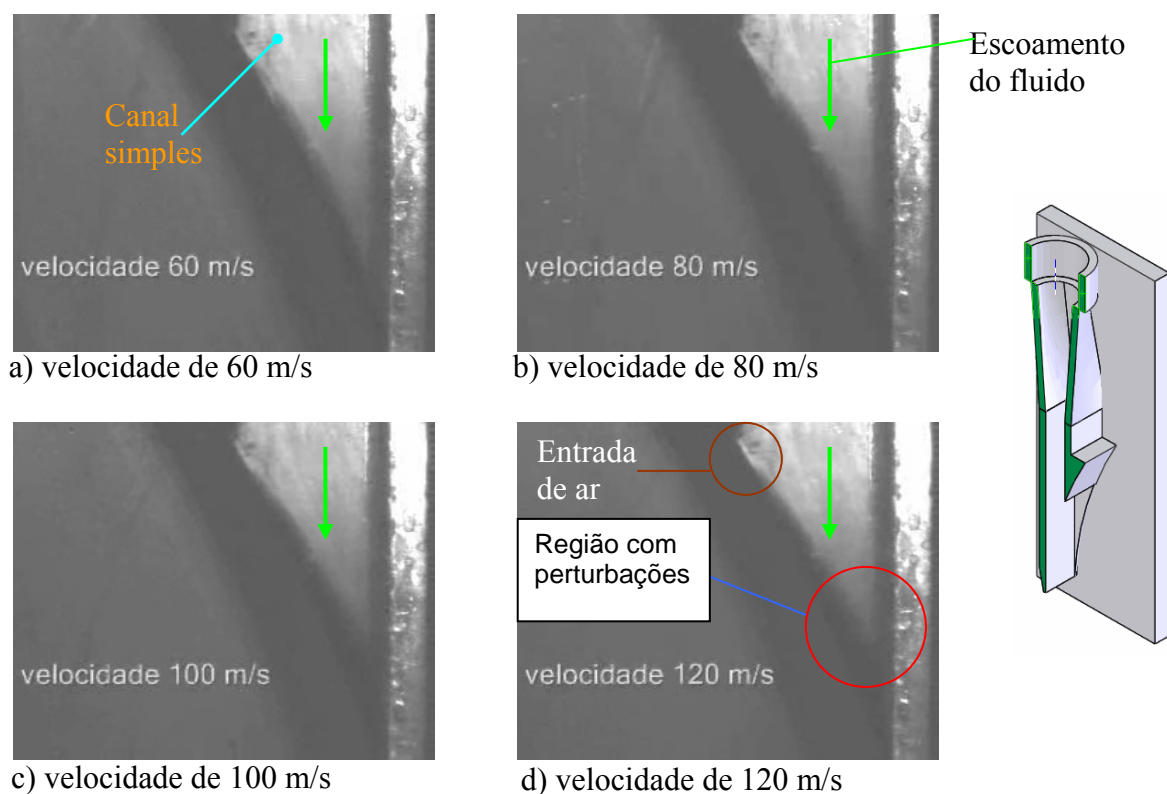


Figura 4.20 – Escoamento do fluido para tubeira A de canal simples próximo a superfície do rebolo para velocidade variável (filme 12 do CD anexo).

A tubeira C côncava com três canais apresenta grande perturbação no escoamento do fluido. O aumento da velocidade leva ao aumento da turbulência nos canais. A Figura 4.21 (filme 13 do CD anexo) mostra o interior do canal c1 da tubeira C côncava com três canais próximos ao rebolo. Nesta Figura é possível identificar a região onde surgem as bolhas de cavitação e as regiões com perturbações. O filme 13 do CD anexo mostra o fluxo do fluido com variação da velocidade do rebolo. Realizado filmando o canal c1, o filme mostra as regiões onde há turbulência e bolhas de cavitação. O canal c1 da tubeira C côncava com três canais apresenta a maior turbulência quando comparado ao mesmo canal das outras tubeiras.

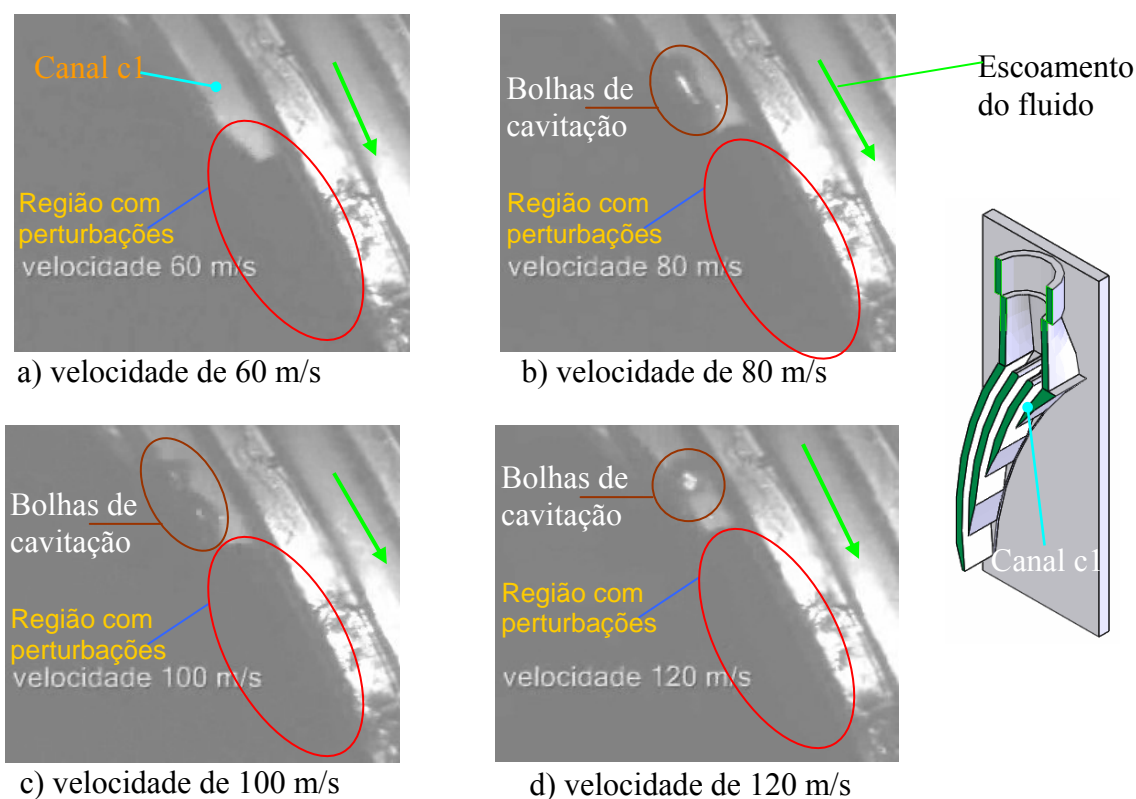


Figura 4.21 – Escoamento do fluido no interior do canal c1 da tubeira C côncava com três canais para velocidade variável (filme 13 do CD anexo).

A Figura 4.22 (filme 14 do CD anexo) mostra o canal c2 da tubeira C côncava com três canais, nela é possível identificar bolhas de cavitação e regiões com perturbações. O filme 14 do CD anexo mostra o fluxo do fluido no canal c2, o aumento da velocidade do rebolo proporciona um aumento na turbulência. Também, aqui, é possível identificar bolhas de cavitação devido à diminuição de pressão. O canal c2 da tubeira C côncava com três canais apresenta a maior turbulência, quando comparado ao mesmo canal das outras tubeiras analisadas.

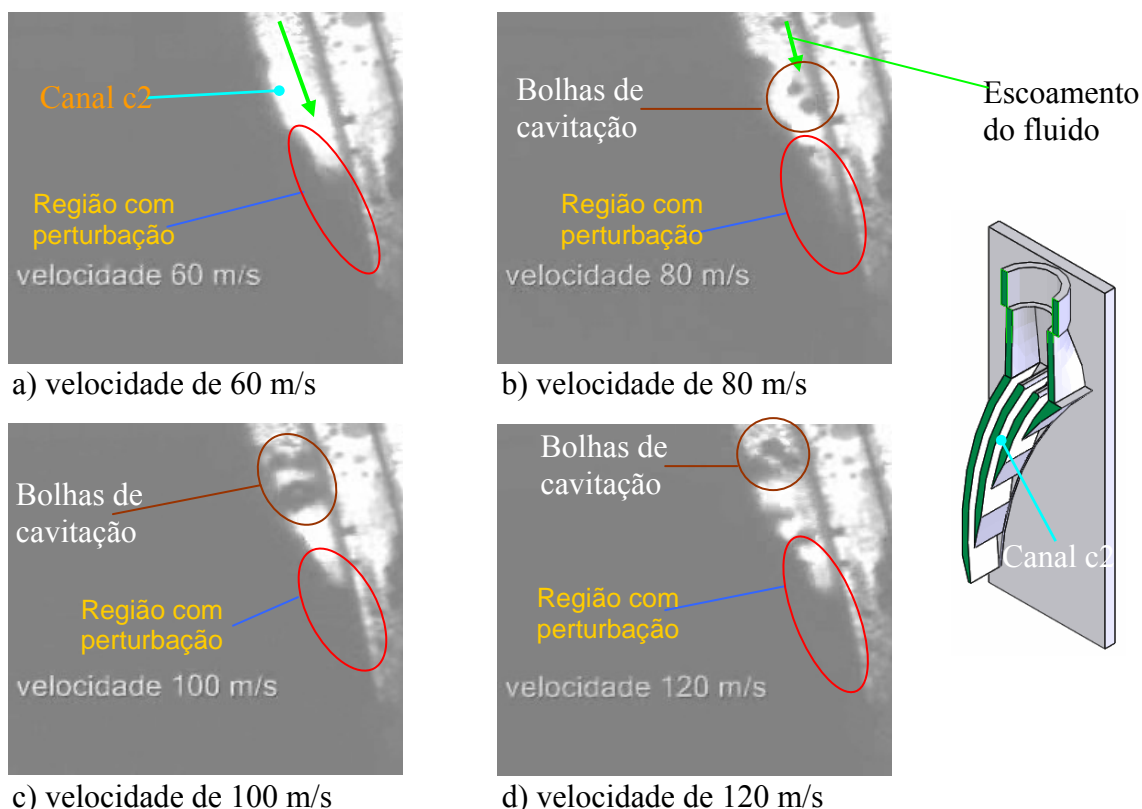


Figura 4.22 – Escoamento do fluido no interior do canal c2 da tubeira C côncava com três canais para velocidade variável (filme 14 do CD anexo).

A Figura 4.23 (filme 15 do CD anexo) mostra o canal c3 da tubeira C côncava com três canais. O filme 15 do CD anexo mostra uma turbulência muito intensa para velocidade de 60 m/s, diminuindo com o aumento da velocidade. A filmagem do canal c3 foi iniciada com o rebolo parado, velocidade periférica igual a zero, para possibilitar a visualização desse canal no início do filme.

Na tubeira B reta com três canais, o aumento da velocidade proporciona um aumento da turbulência no canal c1 (filme 16 do CD anexo). Não é observada entrada de ar entre o rebolo e a tubeira, mesmo para velocidade de 120 m/s. No canal c2 (filme 17 do CD anexo) da tubeira B reta com três canais, a variação da velocidade gera aumento na turbulência. No canal c3, da mesma tubeira, esse fenômeno não é significativo, ou seja, a mudança de velocidade não altera o comportamento do fluido (filme 18 do CD anexo).

O aumento da velocidade proporciona um pequeno aumento da turbulência no canal c1 da tubeira D convexa com três canais que tem o seu valor máximo para velocidade de 100 m/s (filme 19 do CD anexo). No filme 19 é possível visualizar as bolhas de cavitação

formando-se próximo ao rebolo, mas não é possível visualizar entrada de ar, mesmo para velocidade de 120 m/s.

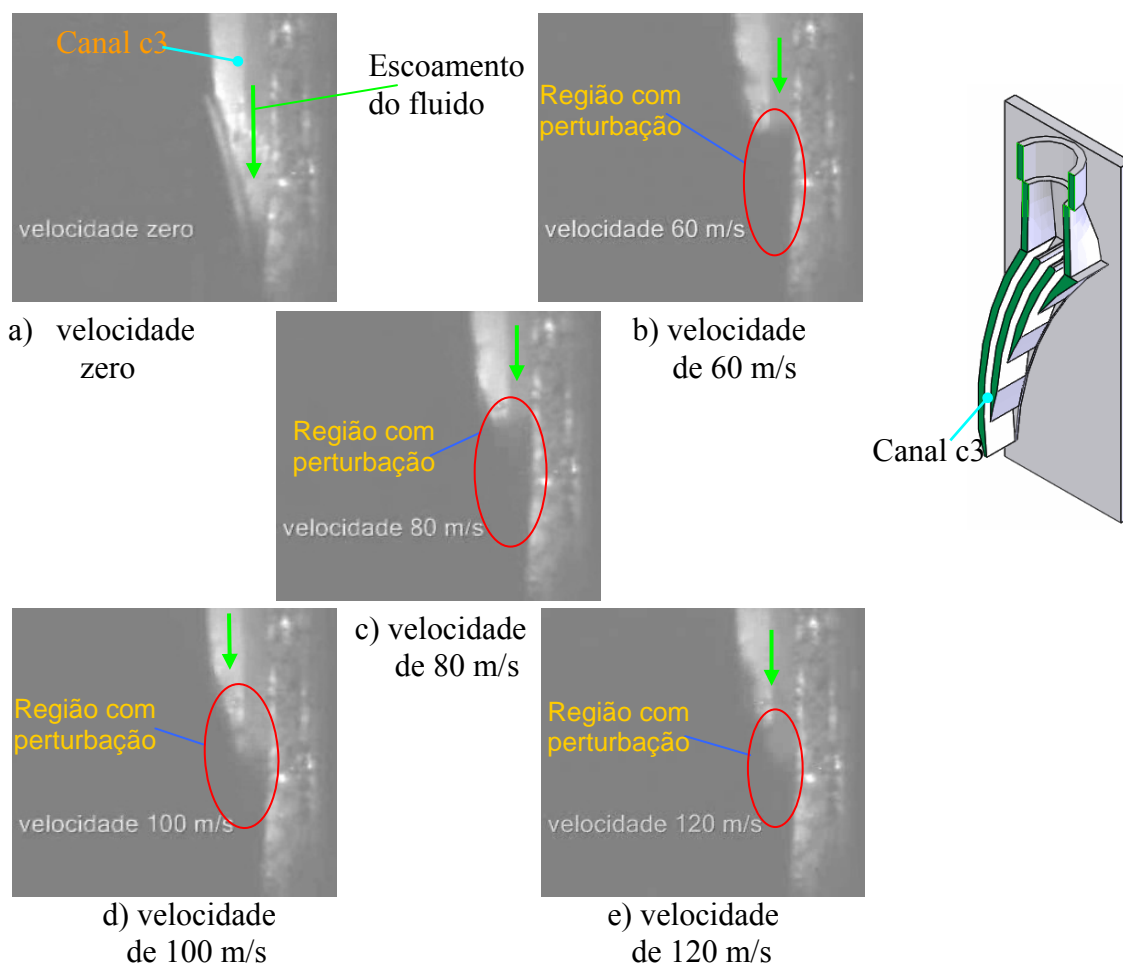


Figura 4.23 – Escoamento do fluido no interior do canal c3 da tubeira C côncava com três canais para velocidade variável (filme 15 do CD anexo).

No canal c2 (filme 20 do CD anexo) da tubeira D convexa com três canais a variação da velocidade altera o comportamento do fluido, sendo que para as velocidades de 60 e 120 m/s tem-se uma turbulência maior, e para as velocidades de 80 e 100 m/s a turbulência praticamente desaparece.

No canal c3 a turbulência é significativa para velocidades baixas (60 m/s), sendo que com o aumento da velocidade há uma diminuição da turbulência do fluido (filme 21 do CD anexo). Isto mostra que a formação de vapor a baixa pressão não depende somente da velocidade periférica do rebolo, mas também da forma com que o líquido atinge a superfície do rebolo. Na tubeira D convexa com três canais o líquido incide radialmente sobre o rebolo o que não acontece com as outras tubeiras analisadas.

A tabela 4.1 sintetiza os resultados obtidos, quanto ao comportamento do fluido no interior das tubeiras tipo sapata com a variação da velocidade periférica do rebolo. A tubeira B reta com três canais apresentou os melhores resultados quanto à turbulência e entrada de ar.

Tabela 4.1 – Comportamento do fluido no interior das tubeiras tipo sapata com variação da velocidade periférica do rebolo para fenda de 0,25 mm e vazão de 10 l/min.

Fenômeno	Tubeira A de canal simples	Tubeira B reta com três canais			Tubeira C côncava com três canais			Tubeira D convexa com três canais		
		Canal c1	Canal c2	Canal c3	Canal c1	Canal c2	Canal c3	Canal c1	Canal c2	Canal c3
Turbulência e vaporização no interior da tubeira	Sim	sim	sim	não	sim	sim	sim	sim	sim	sim
Entrada de ar na fenda entre rebolo e tubeira	Sim	não	não	não	não	não	não	não	não	não

4.5.3 Influência da variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira sobre o escoamento do fluido no interior da tubeira.

A filmagem do escoamento do fluido no interior da tubeira A de canal simples quando a abertura da fenda varia é uma tarefa que requer cuidado especial. Uma pequena variação na distância entre a tubeira e o rebolo altera significativamente o comportamento do fluido. A Figura 4.24 (filme 22 do CD anexo) mostra interior da tubeira A de canal simples indicando as regiões com perturbações e entrada de ar. No filme 22 do CD anexo é possível visualizar para aberturas de fenda 0,10 mm o escoamento com perturbação intensa. De 0,10 até 0,15 mm existe uma perturbação muito pequena. Para aberturas de fenda acima de 0,30 mm é possível visualizar o ar arrastado pelo rebolo, e para valores maiores de aberturas de fenda, o ar entra em grande quantidade. Nas imagens constata-se que a diminuição da abertura da fenda favorece a formação de bolhas de cavitação a baixa pressão pelo aumento da velocidade do fluido impulsionado pelo rebolo.

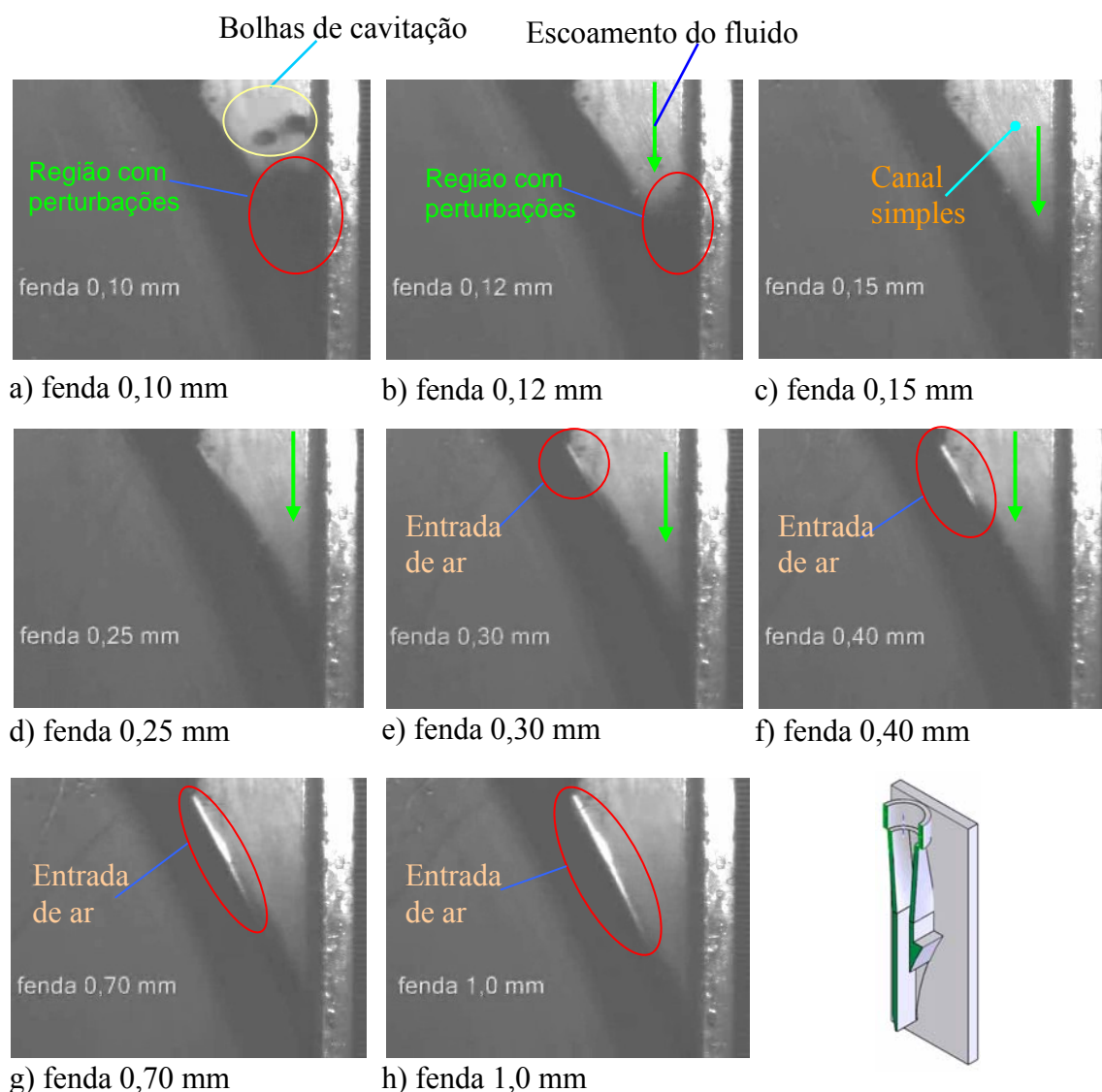


Figura 4.24 – Escoamento do fluido para tubeira A reta de canal simples próximo a superfície do rebolo com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 22 do CD anexo).

Os resultados obtidos nesta etapa mostram uma faixa ótima de trabalho em termos de abertura de fenda entre rebolo e tubeira para cada tubeira analisada.

A Figura 4.25 (filme 23 do CD anexo) mostra o canal c1 da tubeira B reta com três canais. O filme 23 do CD anexo mostra uma influência significativa da abertura da fenda entre rebolo e tubeira no comportamento do fluido. Quando a tubeira está muito próxima do rebolo, entre 0,10 e 0,15 mm, o rebolo girando em alta velocidade cria turbulência muito grande no fluido. Para valores de fenda entre 0,15 e 0,40 mm, a turbulência é moderada. A partir de 0,40 até 1,0 mm não é possível detectar turbulência ou entrada de ar. Para fendas maiores que 1,0 mm a entrada de ar é visualizada. No canal c1, o ar arrastado pelo rebolo

penetra na tubeira e é visualizado na região de saída do canal, junto ao rebolo. A visualização da entrada de ar nesta região é possível devido à transparência do líquido e do material de fabricação da tubeira (acrílico) que nesta posição deixam a luz entrar de forma diferente em relação ao restante da tubeira indicando a presença de ar.

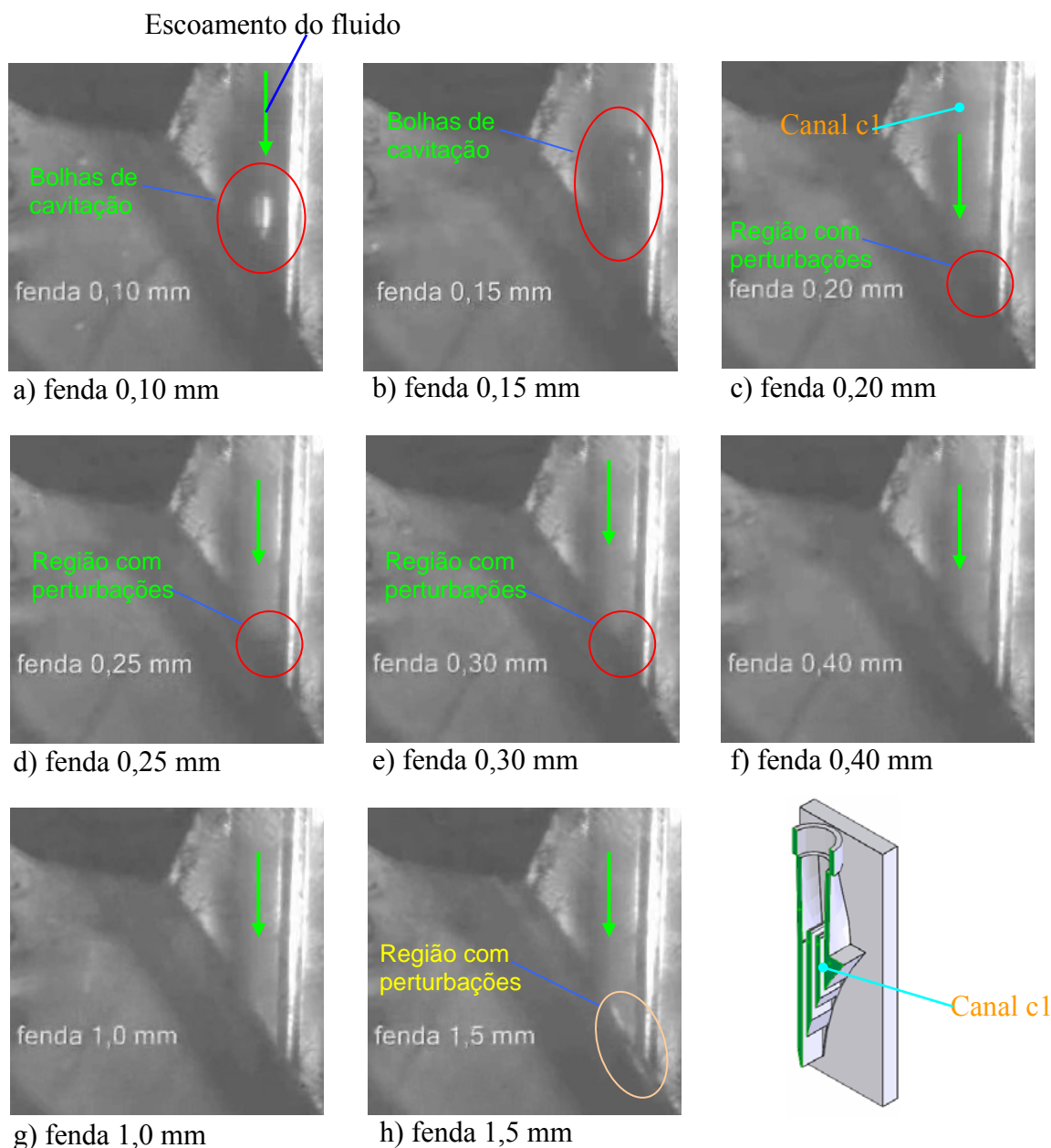


Figura 4.25 – Escoamento do fluido no interior do canal c1 da tubeira B reta com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 23 do CD anexo).

A Figura 4.26 (filme 24 do CD anexo) mostra o canal c2. No filme 24 do CD anexo, para fendas de trabalho pequenas (0,10 a 0,20 mm) a influência sobre o comportamento do fluido é menor quando comparado ao canal c1. Para valores de fenda entre 0,20 e 0,40 mm, a

turbulência é moderada. A partir de 0,40 até 1,0 mm não é possível visualizar turbulência ou aparecimento da entrada de ar. A entrada de ar torna-se visível para fendas maiores que 1,5 mm.

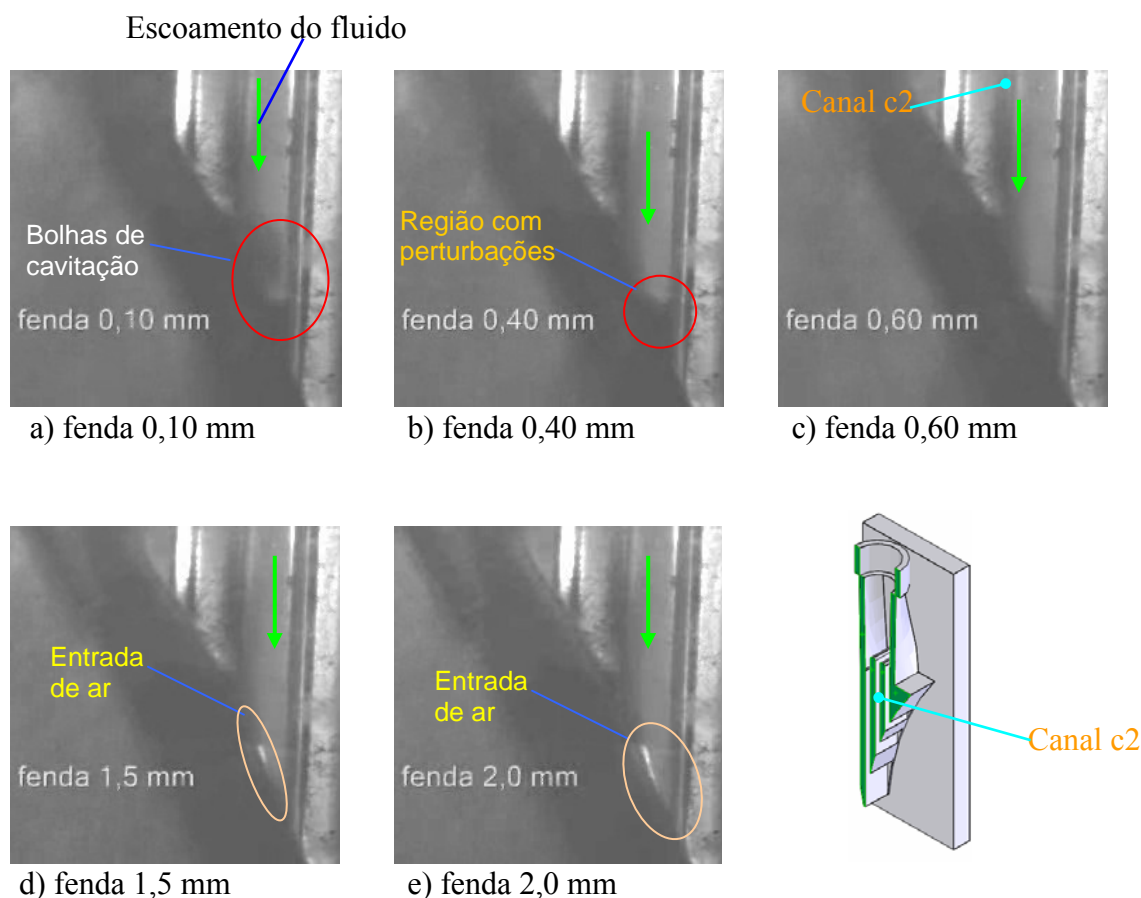


Figura 4.26 – Escoamento do fluido no interior do canal c2 da tubeira B reta com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 24 do CD anexo).

A Figura 4.27 (filme 25 do CD anexo) mostra o canal c3. O filme 25 do CD anexo mostra que para fendas de trabalho pequenas (0,10 a 0,15 mm) a influência sobre o comportamento do fluido é pequena. No (item b) da Figura para abertura de fenda entre rebolo e tubeira 0,10 mm é possível visualizar bolhas de cavitação que são formadas no canal c1 e descem pelo canal c3, o fluxo não é contínua como é possível constatar comparando na Figura o (item a) com o (item b). Para valores de 0,15 mm até 1,5 mm não é possível detectar turbulência ou aparecimento da entrada de ar.

A Figura 4.28 (filme 26 do CD anexo) mostra o canal c1 da tubeira C côncava com três canais.

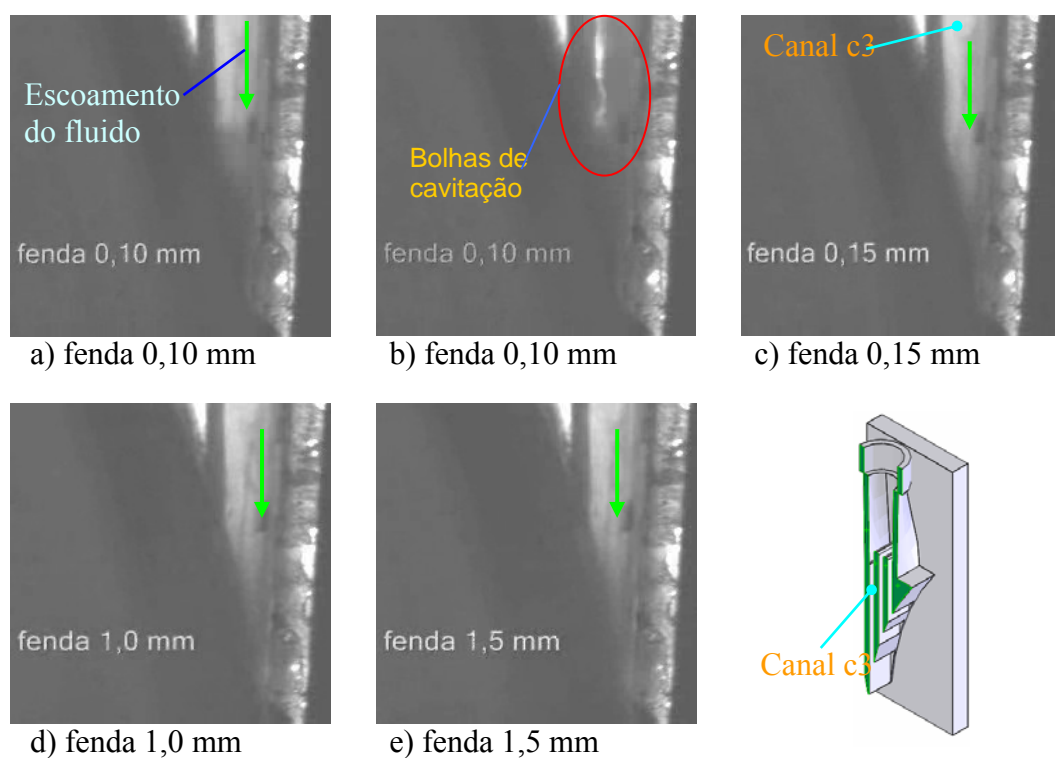


Figura 4.27 – Escoamento do fluido no interior do canal c3 da tubeira B reta com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 25 do CD anexo).

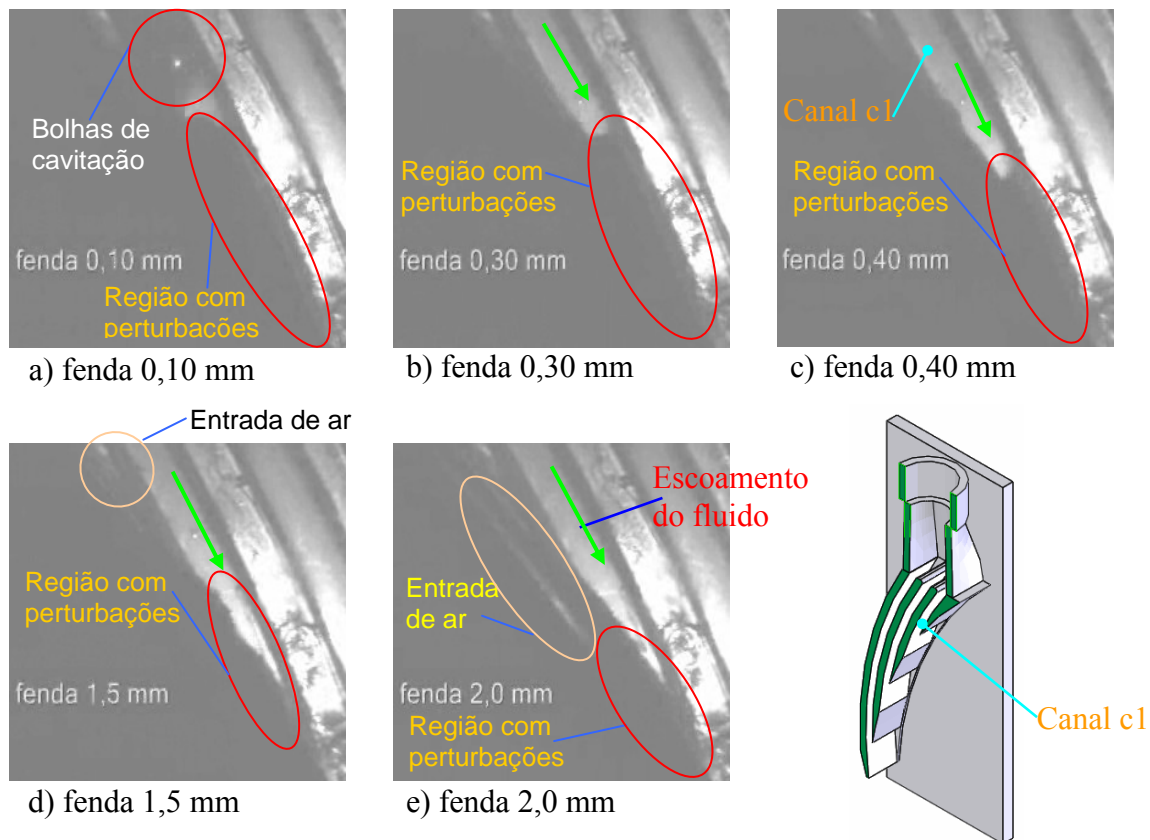


Figura 4.28 – Escoamento do fluido no interior do canal c1 da tubeira C côncava com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 26 do CD anexo).

No filme 26 do CD anexo as filmagens do canal c1 da tubeira C côncava com três canais, mostram para abertura da fenda entre rebolo e tubeira entre 0,10 e 0,30 mm uma turbulência muito grande no fluido. Para valores de fenda acima de 0,30 mm a turbulência diminui gradativamente com o aumento da fenda, mas não desaparece. A partir de 1,50 mm é possível visualizar a entrada de ar.

A Figura 4.29 (filme 27 do CD anexo) mostra o canal c2. No canal c2, a abertura da fenda entre rebolo e tubeira pequena tem grande influência no comportamento do fluido e diminui muito lentamente com o aumento da fenda (filme 27 do CD em anexo). Para fendas de 1,0 mm ainda há perturbação do fluido. A entrada de ar não é visualizada para fendas até 2,0 mm.

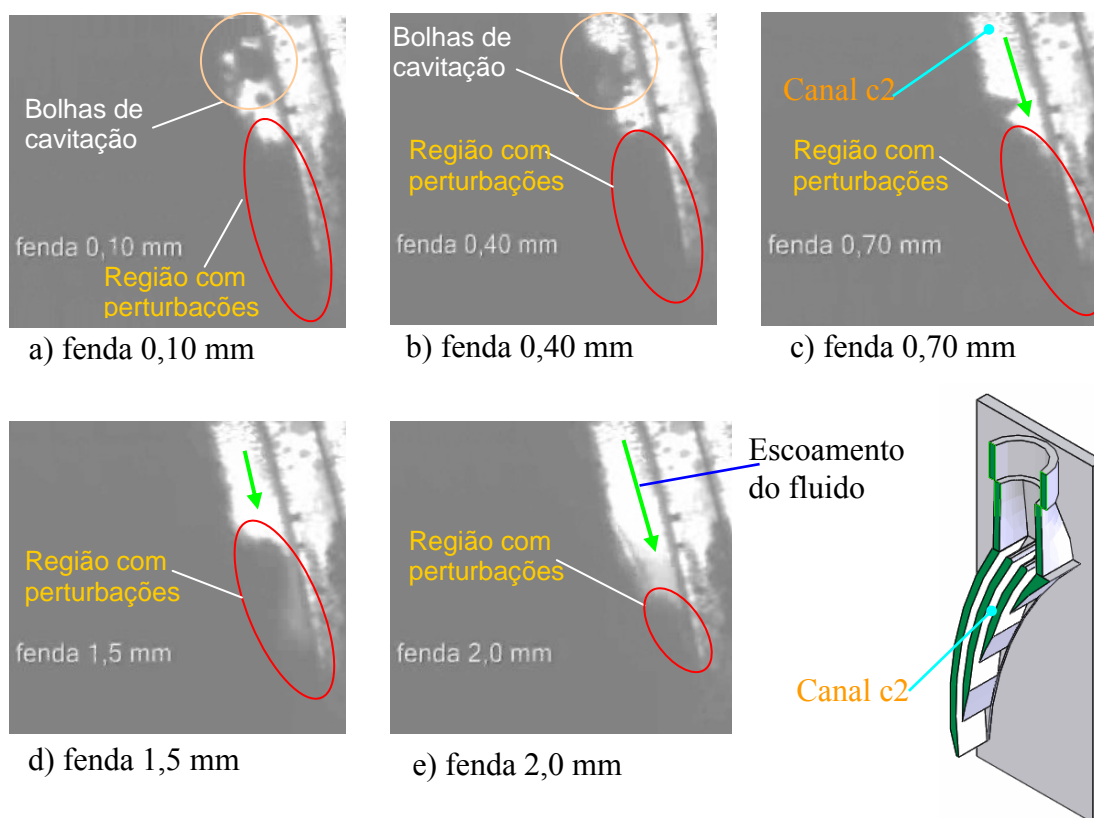


Figura 4.29 – Escoamento do fluido no interior do canal c2 da tubeira C côncava com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 27 do CD anexo).

A Figura 4.30 (filme 28 do CD anexo) mostra o canal c3. No canal c3 (filme 28) para fendas de trabalho pequenas (0,10 a 0,30 mm) a influência sobre o comportamento do fluido é grande. Para valores de fenda entre 0,30 e 1,0 mm, existe uma pequena turbulência. Para fendas maiores que 1,5 mm a entrada de ar torna-se visível.

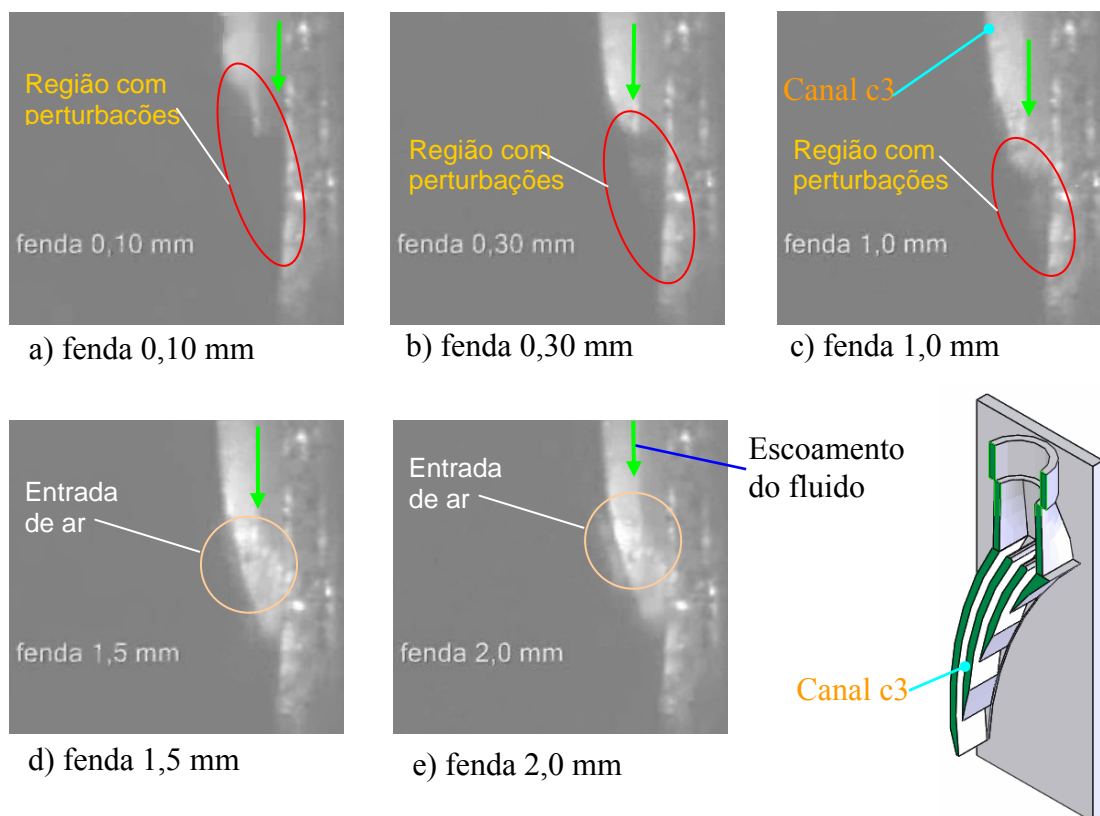


Figura 4.30 – Escoamento do fluido no interior do canal c3 da tubeira C côncava com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 28 do CD anexo).

Para tubeira D convexa com três canais no canal c1 (filme 29 do CD em anexo) para abertura da fenda entre rebolo e tubeira de 0,10 e 0,30 mm, é visualizada uma turbulência muito intensa no fluido. Para valores de fenda entre 0,30 e 0,70 mm, não é possível visualizar turbulência. A partir de 0,70 mm a entrada de ar é visualizada. A Figura 4.31 (filme 29 do CD anexo) do canal c1 mostra a região onde surge as perturbações e entrada de ar.

No canal c2 (filme 30 do CD em anexo) para fendas de trabalho pequenas (0,10 mm) a influência do rebolo sobre o comportamento do fluido é grande. Para valores de fenda entre 0,20 e 0,70 mm, não é possível detectar turbulência nem aparecimento da entrada de ar. Para fenda maior que 1,0 mm a entrada de ar é visível. A Figura 4.32 (filme 30 do CD anexo) mostra o canal c2 e ilustra estes fenômenos.

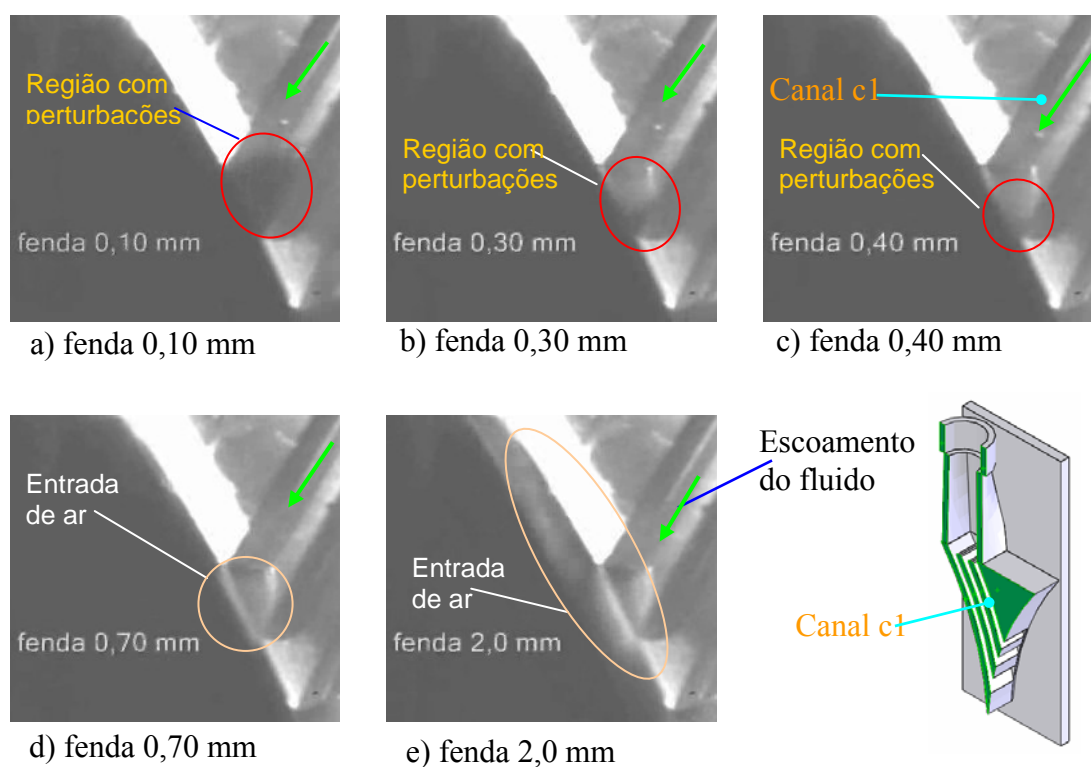


Figura 4.31 – Escoamento do fluido no interior do canal c1 da tubeira D convexa com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 29 do CD anexo).

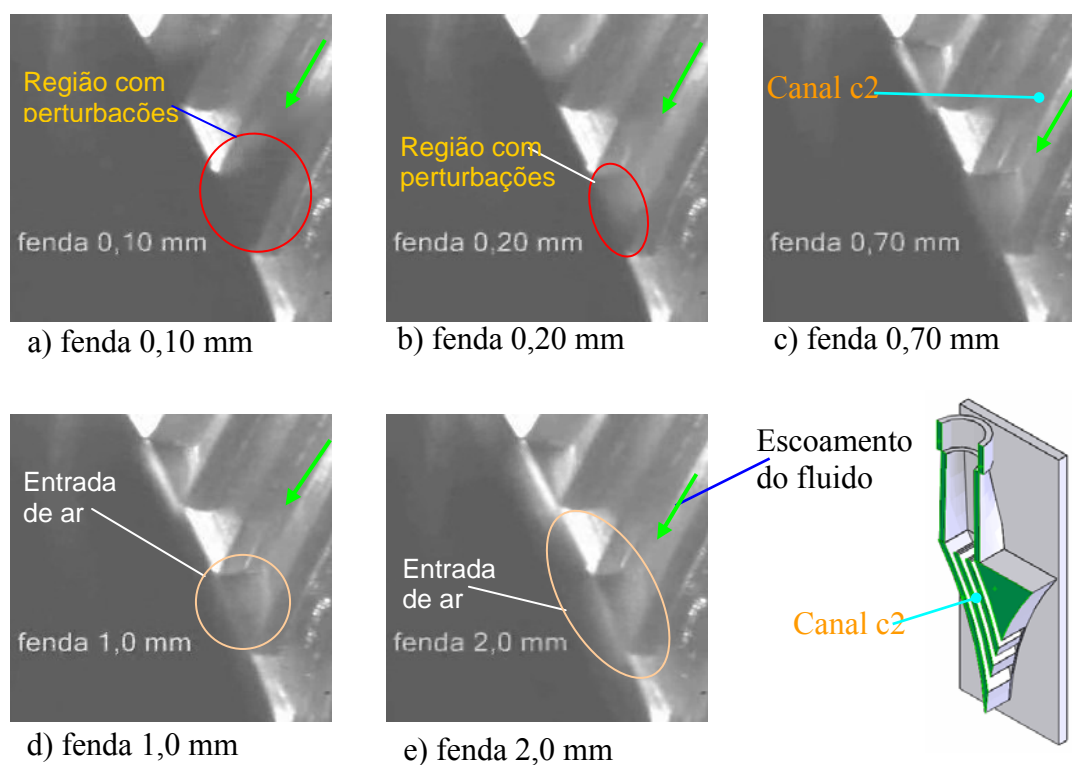


Figura 4.32 – Escoamento do fluido no interior do canal c2 da tubeira D convexa com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 30 do CD anexo).

A Figura 4.33 (filme 31 do CD anexo) mostra o canal c3. No filme 31 do CD em anexo visualiza que para fendas de trabalho pequenas (0,10 a 0,20 mm) a influência do rebolo sobre o comportamento do fluido é grande. Para valores de fenda entre 0,20 e 1,0 mm, não é possível visualizar turbulência ou aparecimento da entrada de ar. Para fenda maior que 1,0 mm a entrada de ar é visível.

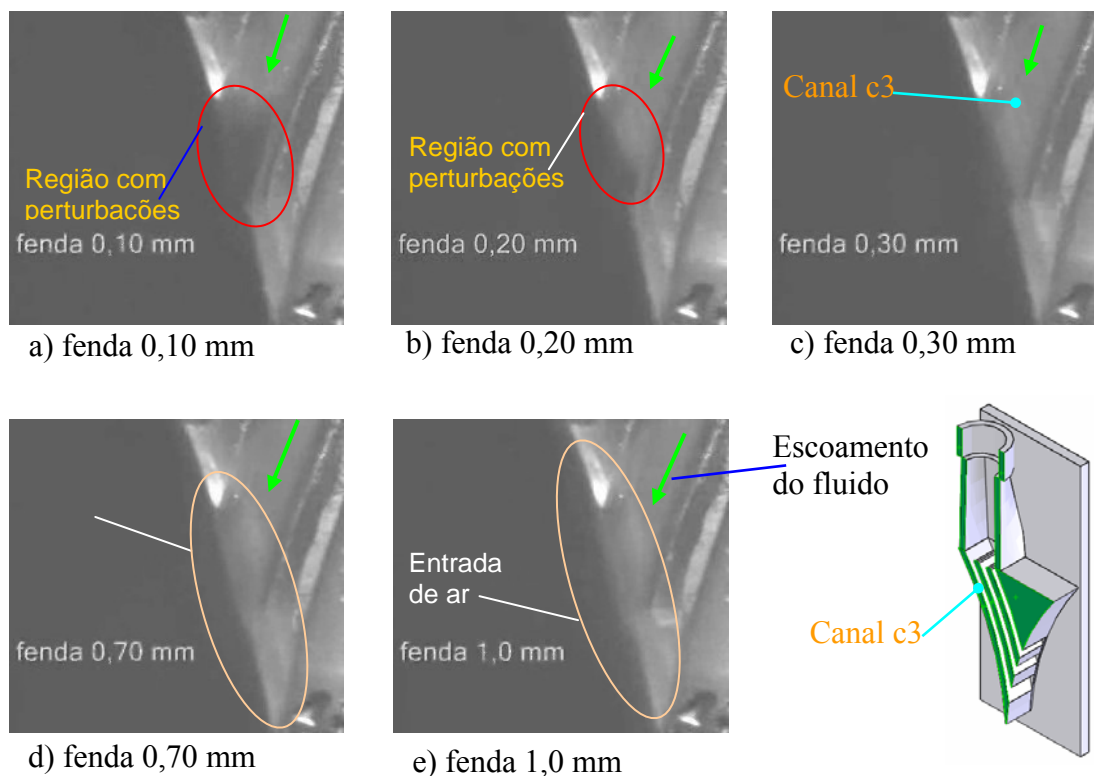


Figura 4.33 – Escoamento do fluido no interior do canal c3 da tubeira D convexa com três canais com variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira (filme 31 do CD anexo).

Na tabela 4.2 os valores de abertura da fenda entre rebolo e tubeira onde há turbulência e entrada de ar são mostrados. Analisando o canal c3 das diversas tubeiras e comparando com os da tubeira A de canal simples, verifica-se que a faixa de trabalho, em que não ocorre turbulência e nem presença do ar, possuem valores bastante distintos. Para tubeira A de canal simples a faixa de trabalho ótima está situada entre 0,15 e 0,30 mm, faixa considerada muito pequena e difícil de controlar, dentro do processo produtivo. Para a tubeira B reta com três canais, a faixa de trabalho ótima está entre 0,15 e 1,5 mm o que facilita o controle do processo mesmo para rebolos convencionais. Para a tubeira C côncava com três canais, não existe uma faixa de trabalho ótima, já que a turbulência aparece para todos os valores de fenda ensaiados. Para tubeira D convexa com três canais a faixa de trabalho ótima está entre 0,20 e 1,0 mm.

Para alta velocidade (100 m/s), na região de contato do líquido com o rebolo, o rebolo exerce uma componente de força que tende a afastar o líquido, sendo necessário que o líquido incida sobre o rebolo com uma pressão contrária que anule a força de repulsão do rebolo, evitando a formação de vapor à baixa pressão, motivo que confere a tubeira B reta com três canais e D convexa com três canais os melhores resultados quanto à turbulência.

Tabela 4.2 – Comportamento do fluido no interior das tubeiras tipo sapata com velocidade periférica do rebolo 100 m/s, vazão 10 l/min e variação da fenda entre rebolo e tubeira (mm).

Fenômeno	Tubeira A de canal simples	Tubeira B reta com três canais			Tubeira C côncava com três canais			Tubeira D convexa com três canais		
		Canal c1	Canal c2	Canal c3	Canal c1	Canal c2	Canal c3	Canal c1	Canal c2	Canal c3
Turbulência e vaporização no interior da tubeira	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	a 0,15	a 0,40	a 0,40	a 0,15	a 2,0	a 2,0	a 2,0	a 0,30	a 0,20	a 0,20
Entrada de ar na fenda entre rebolo e tubeira	acima de 0,30	acima de 1,0	acima de 1,5	acima de 1,5	acima de 1,5	não até 2,0	acima de 1,5	acima de 0,7	acima de 1,0	acima de 1,0

4.5.4 Influência da vazão no escoamento do fluido nos canais das tubeiras.

A Figura 4.34 (filme 32 do CD anexo) mostra a tubeira A de canal simples, nela é indicada a região onde acontece a maior turbulência, no filme 32 do CD anexo é possível visualizar a turbulência indicada na Figura. Está turbulência é bastante significativa para vazão de 5 l/min. Para vazões maiores essa turbulência não é mais visualizada.

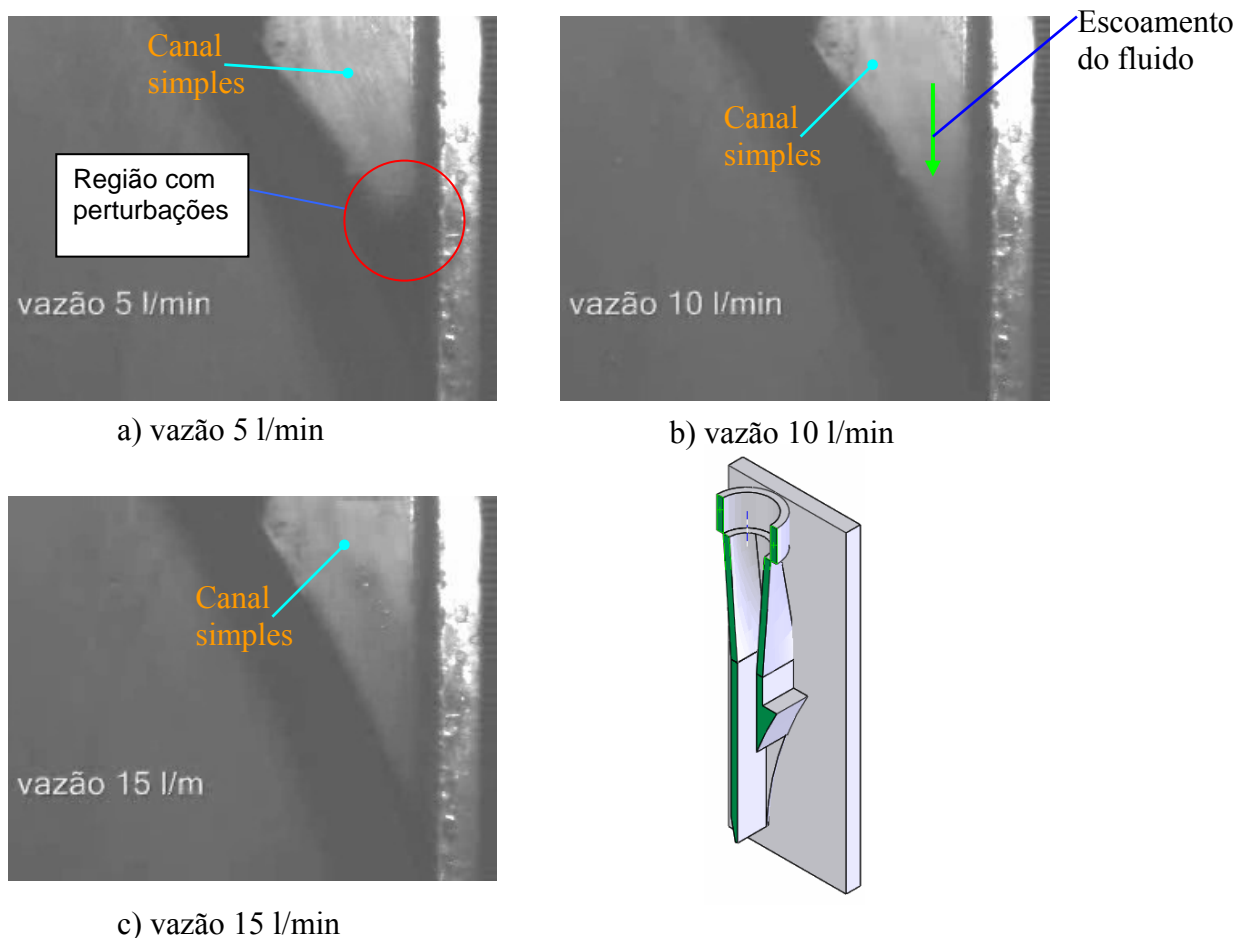


Figura 4.34 – Escoamento do fluido no interior da tubeira A de canal simples, velocidade de 100 m/s e vazão de 5 l/min (vazão de 5 a 15 l/min, filme 32 do CD anexo).

A tubeira C côncava com três canais apresentou a maior turbulência no escoamento do fluido com a variação da vazão.

Na tubeira B reta com três canais e D convexa com três canais a perturbação é mínima.

A variação da vazão do fluido que passa no canal c1 da tubeira C côncava com três canais (filme 33 do CD anexo) mostra que o aumento da vazão altera o comportamento do fluido. A Figura 4.35 (filme 33 do CD anexo) mostra o canal c1. Para vazão de 5 l/min existe uma grande turbulência na saída do canal, que diminui com o aumento da vazão para 10 l/min e persiste para vazão de 15 l/min.

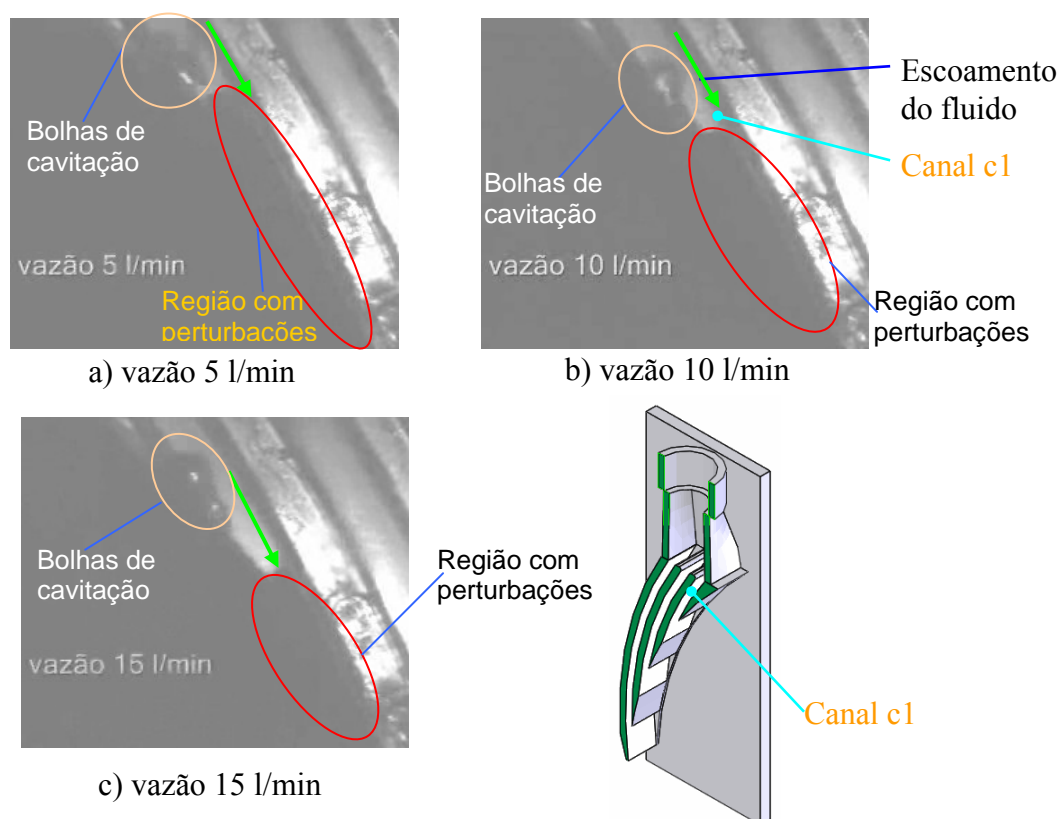


Figura 4.35 – Escoamento do fluido no interior do canal c1 da tubeira C côncava com três canais variando a vazão do fluido (filme 33 do CD anexo).

Para as mesmas condições do canal c1, o canal c2 apresenta uma diminuição pequena na turbulência do fluido com o aumento da vazão (filme 34 do CD em anexo). A Figura 4.36 (filme 34 do CD em anexo) mostra o canal c2 e neste canal as regiões com perturbações e as bolhas de cavitação.

No canal c3 a turbulência visualizada é maior para vazão de 5 l/min (filme 35 do CD anexo) e diminui para vazão de 10 l/min e 15 l/min. A Figura 4.37 (filme 35 do CD anexo) mostra este canal.

Na tubeira B reta com três canais, o aumento da vazão proporciona uma diminuição pequena da turbulência do fluido no canal c1 (filme 36 do CD anexo). No canal c2 o aumento da vazão elimina a turbulência (filme 37 do CD anexo). No canal c3 a turbulência não foi visualizada mesmo para vazão pequena (filme 38 do CD anexo).

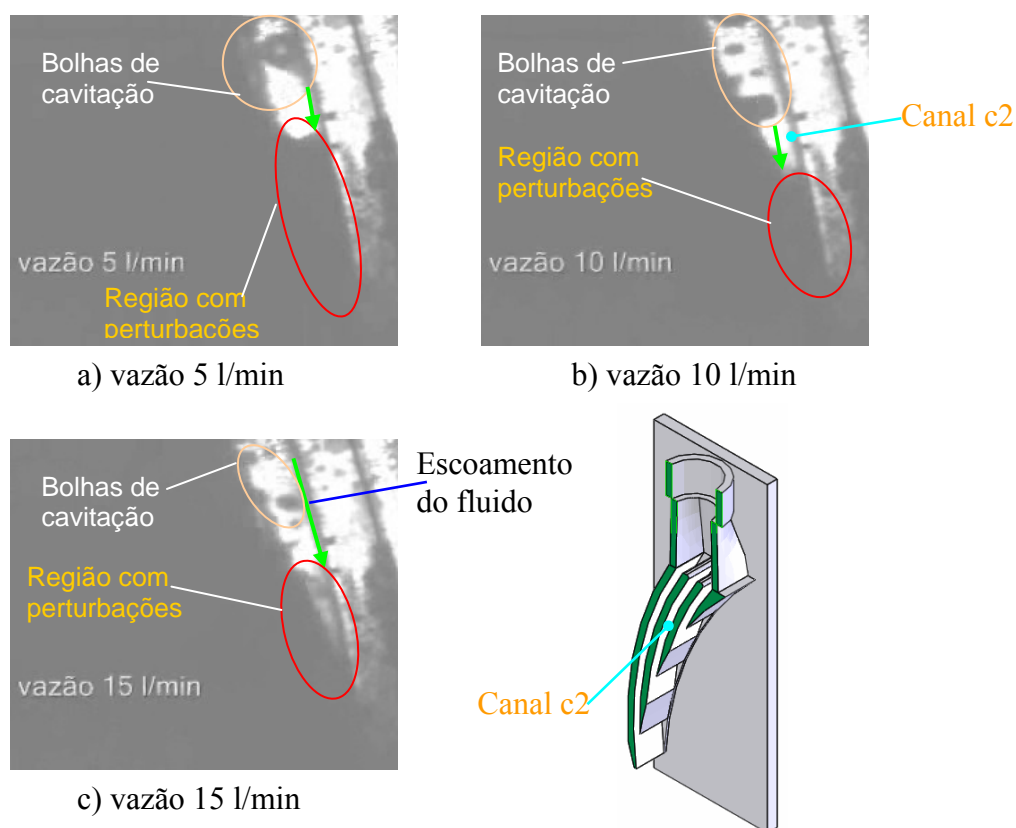


Figura 4.36 – Escoamento do fluido no interior do canal c2 da tubeira C côncava com três canais variando a vazão do fluido (filme 34 do CD anexo).

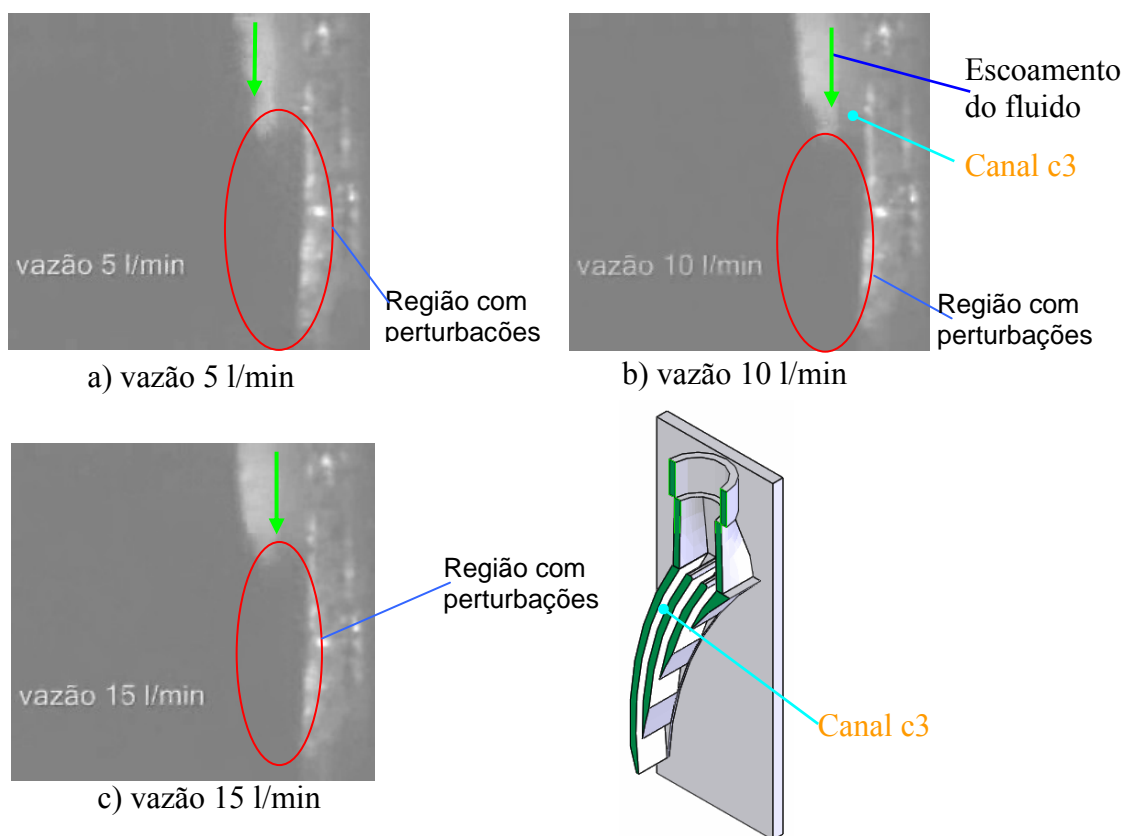


Figura 4.37 – Escoamento do fluido no interior do canal c3 da tubeira C côncava com três canais variando a vazão do fluido (filme 35 do CD anexo).

[illegible]

4.5.5 Influência da topografia do rebolo no escoamento do fluido na tubeira A de canal simples.

As Figuras 4.24 e 4.38 (filmes 22 e 42 do CD anexo) mostram o interior da tubeira A de canal simples. Nos filmes 22 e 42 do CD anexo visualizam-se o escoamento do fluido para diferentes topografias de rebolo (grau de recobrimento $U_d = 1$ e $3,5$), velocidade periférica do rebolo 100 m/s, vazão do fluido de corte 10 l/min e variação da abertura da fenda entre rebolo e tubeira. As diferenças no comportamento do fluido de corte no interior do corpo da tubeira A de canal simples são pequenas (anexo D).

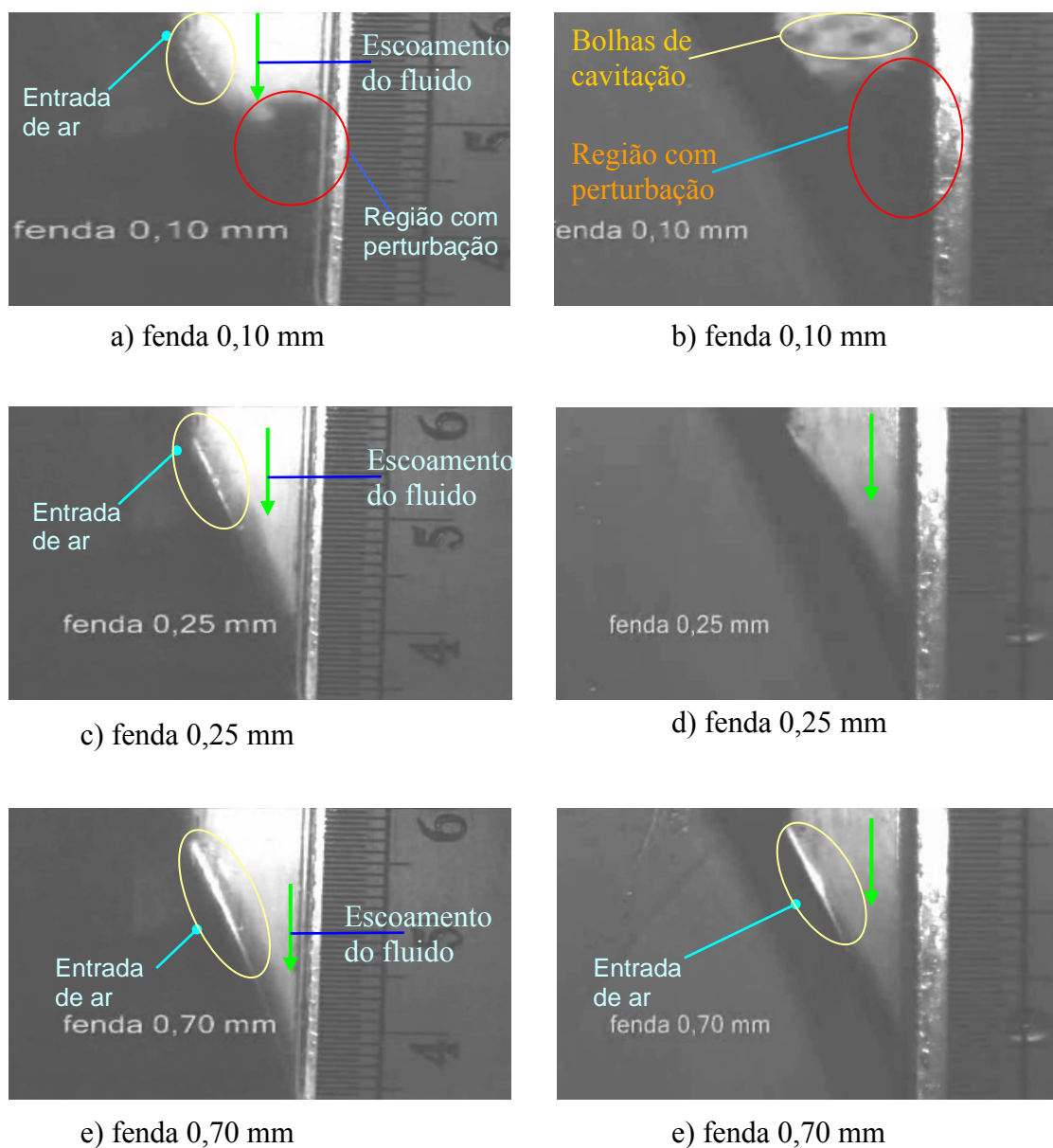


Figura 4.38 – Escoamento do fluido no interior do corpo da tubeira A de canal simples com fenda variável, rebolo dressado com $U_d = 3,5$ (filme 42 do CD anexo).

Na tabela 4.4 o comportamento do fluido para as duas topografias é analisado. O rebolo com topografia mais agressiva apresenta faixa de trabalho (fenda de 0,15 a 0,25 mm) que não aparecem turbulência ou ar arrastado pelo rebolo. Para topografia menos agressiva, não existe uma faixa de trabalho bem definida.

Os melhores resultados obtidos com rebolo de topografia mais agressiva estão associados ao efeito de bombeamento do fluido pelo rebolo para a região de corte. Uma maior quantidade de poros do rebolo com topografia mais agressiva leva a um bombeamento mais eficiente do fluido diminuindo o consumo de energia necessária para movimentar o fluido.

Tabela 4.4 – Comportamento do fluido interior da tubeira A de canal simples para abertura da fenda entre rebolo e tubeira de 0,25 mm, vazão 10 l/min, velocidade periférica do rebolo 100 m/s e diferentes topografias de rebolo.

	Grau de recobrimento $U_d = 3,5$		Grau de recobrimento $U_d = 1$	
Fenda (mm)	Turbulência	Entrada de ar	Turbulência	Entrada de ar
0,10	Intensa	Não	Muito intensa	Não
0,12	Fraca	Não	Fraca	Não
0,15	Fraca	Fraca	Não	Não
0,25	Não	Fraca	Não	Não
0,30	Não	Intensa	Não	Fraca
0,40	Não	Intensa	Não	Fraca
0,70	Não	Muito intensa	Não	Intensa
1,0	Não	Muito intensa	Não	Muito intensa

4.5.6 Alterações no projeto da tubeira B reta com três canais

Na análise do comportamento do fluido no interior das tubeiras foi constatado perturbações na região de entrada dos canais. Para aumentar a eficiência da tubeira B reta com três canais, foram realizadas algumas alterações no projeto das nervuras da tubeira na região de entrada dos canais. As alterações objetivaram diminuir as turbulências nesta região. A Figura 4.39 (filme 43 do CD anexo) mostra as modificações nas aletas que dão origem os canais.

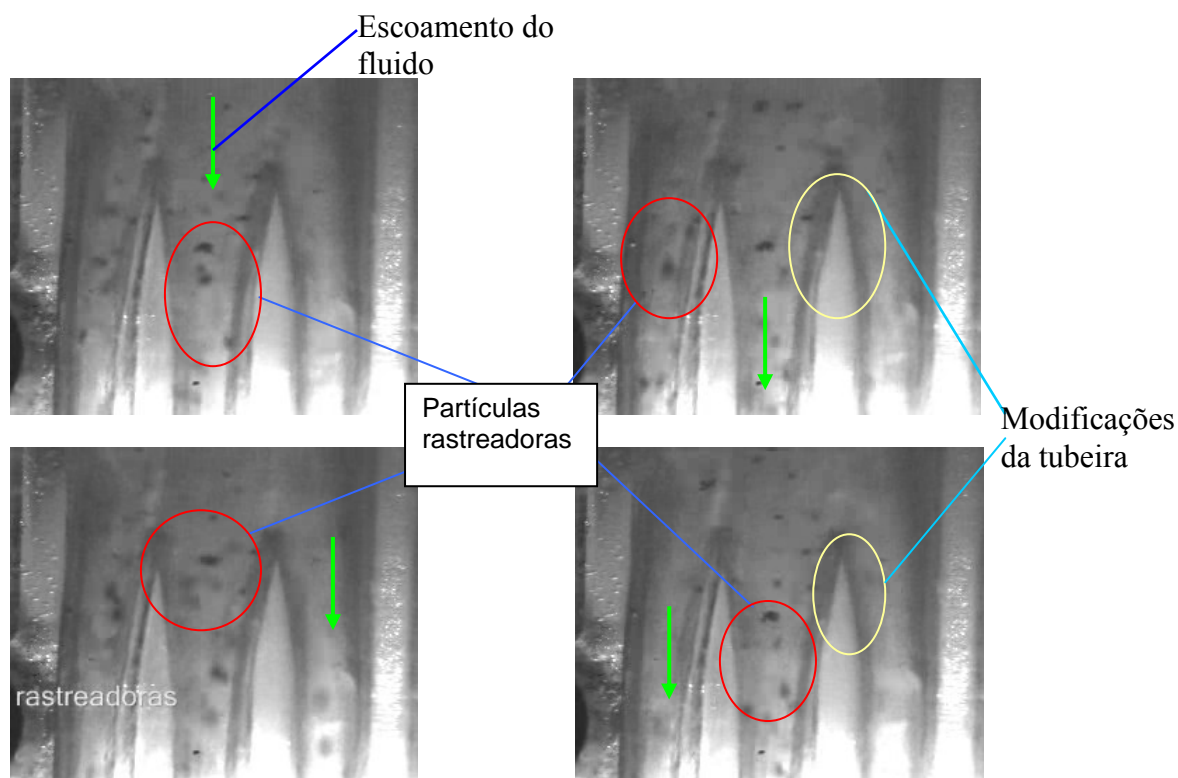


Figura 4.39 – Escoamento do fluido no interior do corpo da tubeira B reta com três canais usando partículas rastreadoras (filme 43 CD em anexo).

No filme 43 do CD anexo o fluido impregnado com glitter, mostra que o novo perfil, mais agudo no início da nervura, melhora significativamente o escoamento do fluido nesta região. Um número pequeno de partículas rastreadoras ainda sofre alterações na trajetória, mas logo a seguir retornam ao seu fluxo normal. Após passar a região de entrada do canal as partículas se alinham em um movimento que indica um escoamento laminar do fluido. Nos canais desta tubeira, também foram realizadas imagens com fluido impregnado com glitter. A Figura 4.40 (filme 44 do CD anexo) mostra os canais da tubeira B reta com três canais. O filme 44 do CD anexo mostra um escoamento laminar das partículas e por consequência um escoamento laminar do fluido.

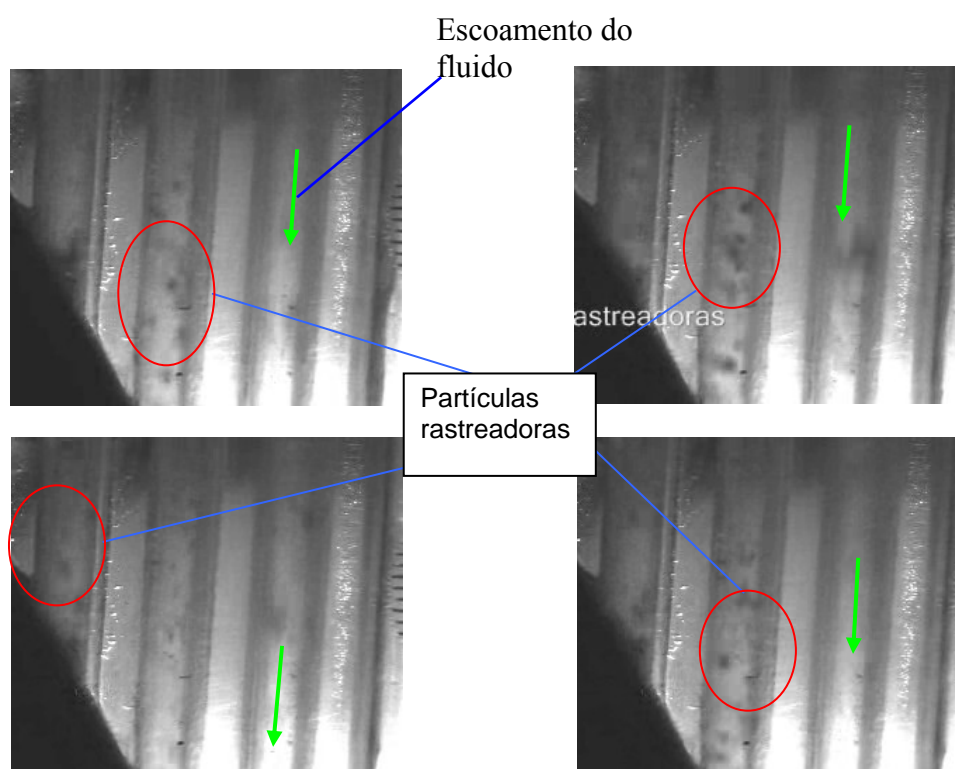


Figura 4.40 – Escoamento do fluido no interior dos canais da tubeira B reta usando partículas rastreadoras (filme 44 CD em anexo).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Trabalhos realizados por (Weingärtner, 2005), já haviam comprovado a eficiência do uso das tubeiras tipo sapata no processo de refrigeração na retificação de mergulho.

Com o objetivo de melhorar o processo de retificação, geralmente a atenção é dada para a influência da variação dos parâmetros de entrada – taxa de retificação, velocidade periférica do rebolo - sobre os resultados de trabalho, como desgaste do rebolo, qualidade da superfície da peça retificada, contaminação do fluido de corte. Uma menor quantidade de trabalhos se ocupa com a influência da tubeira sobre a eficiência do processo de retificação. Os resultados obtidos, neste trabalho, mostram a importância do conhecimento do que acontece no interior do corpo da tubeira do tipo sapata, visto que através de mudanças no projeto da tubeira de alimentação do fluido, obtêm-se melhoras significativas no escoamento de fluido. No uso de um fluido à base de água verificou-se que o consumo de energia para acelerar o fluido perfaz apenas uma parcela da energia consumida em um processo de retificação de alta velocidade. Verificou-se também que a melhor abertura da fenda entre rebolo e sapata se situa em valores acima de 0,15 mm, podendo atingir valores de até 1 mm. A potência necessária para impulsionar o fluido na saída da tubeira não inviabiliza o processo. Os valores necessários para bombear o fluido pelo rebolo é uma parcela pequena da potência disponível no eixo árvore das retificadoras de alta velocidade que se encontram no mercado. O consumo de energia verificado para acelerar o fluido na fenda entre rebolo e tubeira não requer o uso de conjugados motor-bomba de grande potência para aplicação de tubeiras do tipo sapata.

A tubeira A de canal simples apresenta o menor consumo de energia, a tubeira C côncava com três canais, o maior. O aumento da abertura da fenda provoca uma diminuição da potência consumida e para valores de fenda superiores a 0,25 mm, nos ensaios realizados com um rebolo com uma largura de 28 mm, em nenhum caso foi registrado um consumo de energia maior que 2 kW.

O aumento da vazão do fluido, provocado pela maior abertura do registro do sistema de bombeamento externo, leva ao aumento da energia consumida, sendo que para 10 l/min os valores não são superiores a 1,6 kW.

Os estudos realizados do escoamento do fluido dentro do corpo das tubeiras e nos canais mostraram comportamentos distintos para cada tubeira analisada.

Tubeira A de canal simples - Apresentou uma forte turbulência quando da passagem do fluido ao longo do seu corpo, que aumenta na região próxima do rebolo. Para velocidades periféricas do rebolo de 120 m/s, fenda de 0,25 mm e vazão de 10 l/min, verifica-se que o ar é arrastado pelo rebolo para a interface tubeira – rebolo e uma turbulência do fluido são verificados junto ao rebolo.

Os resultados obtidos com a variação da abertura da fenda para velocidades de 100 m/s e vazão de 10 l/min, permitem concluir que para fendas pequenas (0,10 a 0,20 mm) a turbulência gerada pelo rebolo é intensa, e para fendas maiores que 0,30 mm ar é arrastado pelo rebolo. A faixa de fenda ótima está situada entre 0,20 mm até 0,30 mm.

Com relação à vazão, as turbulências são visualizadas apenas para vazão baixa (5 l/min), não sendo verificadas para vazões maiores.

Tubeira C côncava com três canais - Uma análise da vazão no corpo da tubeira mostra a forte turbulência no escoamento do fluido pela presença das nervuras que dividem o escoamento. Ao longo da trajetória no interior dos canais o escoamento apresenta pouca turbulência.

Ao longo dos canais da tubeira C côncava com três canais, para todas as velocidades estudadas as turbulências verificadas são pequenas com a variação da velocidade e é verificada uma maior estabilidade do escoamento com o aumento da velocidade periférica do rebolo. Não foi possível visualizar a entrada de ar mesmo com o aumento da velocidade até 120 m/s.

Aumentando a abertura da fenda entre rebolo e tubeira, verifica-se que junto ao rebolo, na tubeira côncava, existem perturbações geradas pelo rebolo em todos os canais da tubeira. Essas perturbações são maiores para fendas menores e diminuem com o aumento da fenda. Apenas para uma abertura da fenda acima de 1,5 mm verifica-se o arraste de ar pelo rebolo para a interface tubeira - rebolo.

A variação da vazão não influi significativamente no escoamento do fluido, ou seja, não diminui a turbulência.

Tubeira D convexa com três canais - Nos canais da tubeira D convexa, não há turbulências acentuadas no escoamento do fluido variando a velocidade periférica do rebolo. Para as velocidades analisadas não foi observada a entrada de ar, mesmo para altas velocidades.

A variação da abertura da fenda mostrou que a partir de 0,30 mm até aproximadamente 0,70 mm não ocorreram alterações significativas no escoamento do fluido, nem foi verificado o arraste de ar pelo rebolo para a interface sapata - rebolo. A incidência quase normal do fluido sobre a superfície do rebolo leva a uma maior eficiência da tubeira convexa D quando comparada com a tubeira C côncava.

A tubeira D convexa com três canais apresentou os melhores resultados para vazão de 10 l/min. Para valores maiores (15 l/min), foi observado o aparecimento de fortes turbulências no escoamento do fluido.

Tubeira B reta com três canais - Apresenta os melhores resultados quanto aos parâmetros avaliados. A potência consumida por essa tubeira não ultrapassa 1,5 kW para velocidade de 100 m/s, fenda de 0,25 mm e vazão 10 l/min. Nos canais da tubeira B reta, não são verificadas as fortes turbulências no escoamento do fluido junto ao rebolo. Para as velocidades periféricas do rebolo analisadas, também não foi observado entrada de ar na interface tubeira - rebolo.

A variação da abertura da fenda mostrou que a partir de 0,40 mm até aproximadamente 1,0 mm não são visualizadas turbulências no escoamento do fluido, nem é verificado o arraste de ar para a interface tubeira – rebolo. É uma faixa de trabalho maior do que a obtida com a tubeira D convexa, confirmando a eficiência dos canais iniciais na eliminação do ar arrastado pelo rebolo. A forma e o ângulo com que o fluido entra em contato com o rebolo são mais eficientes quando comparados com a tubeira D convexa. Essa tubeira apresenta uma geometria mais simples, o que diminuem os custos de sua fabricação.

Podem-se empregar vazões de 5 a 15 l/min com esta tubeira, sendo que a partir de 10 l/min foram verificados os melhores resultados.

A tubeira B reta com três canais apresenta bons resultados quanto à potência consumida e não apresenta perturbações significativas no escoamento do fluido ou entrada de ar no sistema. Possui também a vantagem de um escoamento do fluido ausente de perturbações com vazão reduzida de fluido. A possibilidade do uso de pequenas vazões (5 l/min) leva a possibilidade de uma redução significativa nos custos de preparação, manutenção, descarte e filtragem do fluido são possíveis, assim como um ambiente de trabalho menos agressivo ao operador com possibilidade de confinamento da máquina e com uma redução significativa na quantidade de material a ser reciclado.

A possibilidade de fabricar as tubeiras com materiais de baixa resistência mecânica, como o acrílico, abre novas perspectivas para a fabricação de tubeiras. O fornecimento de fluido de baixa viscosidade e em pressões muito pequena viabiliza a fabricação das tubeiras

em materiais como o plástico injetado, o que reduz, significativamente, os custos de fabricação quando comparado às tubeiras fabricadas em aço.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Nos estudos realizados apenas foram avaliadas a influência da geometria de quatro tubeiras sobre os resultados no escoamento. Empregando ferramentas de simulação devem ser estudadas a influência da variação da geometria da tubeira com relação à espessura das aletas da tubeira e verificar-se assim qual a influência que estas têm sobre o arraste do ar para a interface tubeira – rebolo bem como sobre a formação do jato de fluido na saída da tubeira.

Determinar o fator de Thoma (fator de cavitação) para tubeiras tipo sapata na região junto ao rebolo na retificação de alta velocidade. Durante as filmagens constatou-se o aparecimento de bolhas de vapor na região da tubeira próximas ao rebolo. Este fenômeno gera perturbação no fluido prejudicando o bom funcionamento das tubeiras. A determinação das condições de pressão, velocidade, vazão e distância entre rebolo e tubeira com vistas à previsão ou eliminação das bolhas de cavitação é tema importante para estudos futuros.

Projetar e avaliar o uso de canais com dimensões diferentes da estudada neste trabalho. A concepção da sapata é um fator que influencia no escoamento do fluido e na eficiência da aplicação do mesmo, como foi demonstrada no escopo deste trabalho. O uso de canais mostrou ser mais eficiente que o uso de sapatas de canal simples, possibilitando o uso de fendas maiores para alta velocidade sem que fosse permitida a entrada de ar ou turbulência no escoamento do fluido. Nesse trabalho as dimensões dos canais foram mantidas constantes em todos os ensaios.

Avaliar o desempenho das tubeiras com fluidos mais viscosos.

Avaliar as tubeiras em serviço, validando os resultados da análise do escoamento do fluido.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALBERTAZI Jr., A. **Metrologia – Parte 1**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Apostila
2. ANSYS INC., Ansys, **Manual de instrução**. Version CFX 5.7, USA, 2004.
3. AULT, W. Types of Grinding Wheels. **Wandbook of Modern Grinding Technology**. Cap. 3, p. 73-87, 1978.
4. BAILEY, M. W., JUCHEM, H. O., COOK, M. W., COLLINS, J. L., BUTLER-SMITH, P. **The increasing importance of PCD/diamond/CVD and PCBN/CBN tooling in the automotive industry**. Industrial Diamond Review, vol. 1, 2002, p. 53-60.
5. BARNARD, J. M. **The use of Cubic Boron Nitride in the production grinding field (Part 2)**. Aircraft Engineering, vol. 61, nº 7, 1989, p. 24 – 27.
6. BASTOS, F. **Retificação cilíndrica externa para diferentes condicionamento do rebolo de nitreto de boro cúbico**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 1999.
7. BATCHELOR, G. K. **In Introduction to Fluid Dynamics**. Cambridge Mathematical Library, 614p, 2000.
8. BECK, T. **Kühlschmierstoffeinsatz beim Schleifen mit CBN**. Dissertation (Doutorado em Engenharia) – RWTH-Aachen. 2002, 150 p.
9. BERNOLLI, W. E., STREETER, V. L. **Mecânica dos fluidos**. São Paulo. Editora McGraw-Hill Ltda., 1985, 585 p.

10. BERTALAN, Cláudio. **Retificação com rebolos de nitreto de boro cúbico em máquinas ferramentas convencionais**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 1997.
11. BIANCHI, E. C., CATAI, E. C., AGUIAR, P. R. **Formas otimizadas para a aplicação de fluidos de corte na retificação dos metais**. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais – CBECIMAT, Natal, RN, Brasil, 2002, 6p.
12. BRINKSMEIER, E., BROCKHOFF, T. **Utilization of Grinding Heat as a New Heat Treatment Process**. Annals of the CIRP, vol. 45, 1996, p. 283-286.
13. BRINKSMEIER, E., BROCKHOFF, T., WALTER, A. **Minimun quantity lubrication in grinding**. In: International Machining & Grinding Conference, sep. 8 – 11, 1997. Dearborn. Anais... Michigan:SME, 2000. 8 p.
14. BRINKSMEIER, E., HEINZEL, C., WITTMANN, M. **Friction, cooling and lubrification in grinding**. Annals of the CIRP, França, vol. 48, nº 2, 1999, p. 581-598.
15. BRINKSMEIER, E., HEINZEL, C., WITTMANN, M., SCHMID, U., DREYER, M., RATH H. J. **Como a aplicação do fluido refrigerante pode ser melhorada na retificação**. Revista Máquinas e Metais, Outubro, 2001, p. 34 – 41.
16. BURMEISTER, N. M. **Óleos lubrificantes usados**. Site institucional da Indústria Petroquímica do Sul, Disponível em: <<http://www.petroquimicasul.com.br>>. Acesso em: 13 jun. 2006.
17. CARIUS, A. **The grindability of powder metal materials using CBN abrasives**. In: Intertech, July 17-21, 2000, Vancouver-Canada. Annals...Vancouver-Canada, 2000.8p.
18. CATAI, R. E. **Otimização das condições de refrigeração/lubrificação no processo de retificação cilíndrica de mergulho**. Tese de Doutorado – UNESP, Guaratinguetá, SP, Brasil, 2004.

19. CHEN, X., ROWE, W.B., McCORMACK, D. F. **Predicting the transitional boundary of tensile residual stress in grinding.** Abrasive Magazine, 2000, p. 28 – 35.
20. DA SILVA, J. C. L. **Retificação cilíndrica externa de mergulho do aço 100Cr6 com rebolo 38A120MVS.** Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 1999.
21. DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 2ª Edição, 2000, p.225-244.
22. EBBREL, S., WOOLLEY, N. H., TRIDIMAS, Y. D., ALLANSON, D. R., ROWE, W. B. **The effects of cutting fluid application methods on the grinding process.** International Journal of Manufature, vol. 40, 2000, p. 209 – 203.
23. EL BARADIE, M. A. **Cutting fluids: Part I. Characterisation.** Journal of Materials Processing Technology, Irlanda, vol. 56, 1996, p. 786 – 797.
24. ENGINEER, F., GUO, C., MALKIN, S. **Experimental measurement of fluid flow through the grinding zone.** ASME, Journal of Engineering for Industry, USA, vol. 114, 1992, p. 61 – 66.
25. FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem de Metais.** São Paulo, Edgaerd Blücher, 1970.
26. FIRMA DIAMETAL AG: **Basic Properties of the Bond Systems.** Disponível em: <[http:// www. Diametal.ch/kataloge/katalog1/em/K1_7_Bindungen.asp](http://www.Diametal.ch/kataloge/katalog1/em/K1_7_Bindungen.asp)>. Acesso em: 10 fev. 2004.
27. GALEN, E. **Superabrasive grinding, why bond selections matter.** SME Magazine, Deaborn-Michigan, 2001, p. 80-87.
28. GE SUPERABRASIVES. **Borazon CBN Product Selection Guide.** Maio 1998. 15p.

29. GUO, C., MALKIN, S. **Analysis of fluid flow through the grinding zone.** ASME, Journal of engineering for industry, USA, vol. 114, 1992, p. 427 – 434.
30. GRAF, C. **Energy partition and cooling during grinding.** Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, 2004, 87p.
31. HAFENBRAEDL, D., MALKIN, S. **Environmentally-conscious minimum quantity lubrication (MQL) for internal cylindrical grinding.** In: NARMAC, 28., may. 24 – 26, 2000, Lexington, Kentucky. Anais... Michigan: SME, 2000. 8p.
32. HITCHINER, M. P. **Technological advances in creep feed grinding of superalloys with CBN.** 3rd International Machining and Grinding Conference SME, Cincinnati, Ohio, October 4 – 7, 1999.
33. HITCHINER, M. P. **O emprego de alta velocidade com rebolos de CBN.** Revista Máquinas e Metais, Setembro, 2001, p. 116 – 133.
34. HOLZ, R., SAUREN, J. **Schleifen mit Diamant und CBN.** 1. ed. Alemanha: Winter Diamantwerkzeuge Bornitridwerkzeuge, 1988. 172p.
35. HOWES, T. D., TÖNSCHOFF, H. K., HEUER, W. **Environmental aspects of grinding fluids.** In: Annals of the CIRP, Keynote Paper, vol. 40, n° 2, August, 1991, p. 623 – 630.
36. IMAI, T., SUGITA, K., UNNO, K. **CBN – Konturstatteinstechschleifen, Werkstatt und Betrieb,** 1995, p. 383 – 386.
37. JACKSON, M., DAVIS, C., HITCHINER, M. P., MILLS, B. **High-speed grinding with CBN grinding wheels – applications and future technology.** Journal of Materials Technology, 2001, p. 78-88.
38. KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; EVANS, C.; HOWES, T.; INASAKI, I; MIKE, E.; TÖNSHOFF, H. K.; WEBSTER, J. A.; STUFF, D. **High-Speed Grinding – Fundamentals and State of the Art in Europe, Japan and USA.** Annaals of the CIRP, v.46, n° 2, 1997, p. 715-724.

39. KLYK, M. **Hochgeschwindigkeitsschleifen mit CBN: Voraussetzungen für die wirtschaftliche Anwendung einer neuen Technologie.** Dissertatin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Technische Universität Braunschweig. Essen: Vulkan Verlag, 1993.
40. KOHLI, S. P., GUO, C., MALKIN, S. **Energy Partition for Grinding with Aluminum Oxide and CBN Abrasive Wheels.** ASME Journal of Engineering for industry, vol. 117, 1995, p. 160 -168.
41. KÖNIG, W. **Retificação, brunimento e lapidação.** Tradução de Walter Weingaertner. Florianópolis: UFSC, 1980. 342 p. Título original: Fertigungsverfahren Band 2: Schleifen, Honen, Läppen.
42. KÖNIG, W., FERLEMANN, F. **CBN Grinding at 500m/s.** IDR 2/91, 1991, p 72-79.
43. LEAL J. **La filtración en los procesos de retificado com muelas de borazon.** Filtrations News, vol. VIII, 1993, p. 1 – 8.
44. LEME, S. P. L. **Dressamento por Toque de Rebolos de CBN.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 1999.
45. LIAO, Y. S., LUO, S. Y., YANG, T. H. **A thermal model of the wet grinding process.** Journal of Materials Processing Technology, nº 101, 2000, p. 137-145.
46. LIERSE, T., KAISER, M. **Dressing of grinding wheels for gearwheels.** Industrial Diamond Review, vol. 4, 2002.
47. MACHADO, A. R., DINIZ, A. E. **Vantagens e desvantagens do uso de fluidos de corte.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXVII, nº 419, 2000, p. 134-151.
48. MALKIN, S. **Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage.** In: MALKIN, S. Grinding Technilogy: theory and aplications of machining with abrasives. 1. ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, Cap. 5 e 6, 1989, p. 108 - 171.

49. MALKIN, S. **Current Trends in CBN Grinding Technology.** Annals of the CIRP, vol. 34, nº 2, 1985.
50. MONICI, R. D. **Análise da mínima quantidade de refrigeração e da refrigeração convencional no processo de retificação no processo de retificação em aços endurecidos.** Dissertação de Mestrado – UNESP, Bauru, SP, Brasil, 2003.
51. MORAWSKA, L., BANGER, N. D., MARONI, M. **Indoor air, integrated approach.** Elsevier, Oxford, 1995.
52. MUCKLI, J. **Hochgeschwindigkeitsschleifen mit keramisch gebunden CBN-Schleifscheiben,** Doctoral Thesis, RWTH- Aachen, 2000.
53. NOVASKI, O., RIOS, M. **Vantagens do uso de fluidos sintéticos na usinagem.** Revista Metal Mecânica, Ano XX, nº 118, 2002, p. 56-62.
54. OLIVEIRA, J. F. G. **Análise da ação do macroefeito de dressamento de rebolos no desempenho do processo de retificação.** Tese de Doutorado – USP, São Carlos, SP, Brasil, 1988.
55. OLIVEIRA, J. F. G. **Controle do estado de afiação de rebolos na retificação de precisão.** EESC: USP.1992. 161 p.
56. OLIVEIRA, J. F. G.; SILVA, E. J.; JÚNIOR, A. B.; SARTORI, C. R. **Influência do tipo de fluido de corte nas variáveis de saída.** Revista Máquinas e Metais, nº 449, jun. 2003, p. 70-99.
57. PUNG, R. C. **Superrabrasives.** General Electric C. O., USA, 1988.
58. RAMOS, C.A.D., COSTA, E. S., MACHADO, A. R. **Tendências, utilização e aspectos ecológicos.** Máquinas e Metais, Brasil, 2003, p. 116 – 134.

59. RAMESH, K., YEO, S. H., ZHONG, Z. W., SIM, K. C. **Coolant shoe development for high efficiency grinding.** Journal of Materials Processing Technology, nº 114, 2001, p. 240-245.
60. RAUTH, K. R., VAHLE, H. R. **Synthetic fluids solve real CBN grinding problems.** Cutting Tool Engineering, 1988, p. 38 – 41.
61. ROWE, W. B., BLACK, S. C. E., MILLS, B. **Temperature control in (CBN) grinding.** In: Annals of the CIRP, vol. 42/1, 1996.
59. SCHROETER, R. B. **Tecnologia da usinagem com ferramenta de geometria definida.** Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Mecânica de Precisão, Florianópolis. Apostila, 2000.
60. SHAW, M. C. **Principles of abrasive processing.** Oxford Science on Advanced Manufacturing, New York, USA, 1996. 574p.
61. SILLIMAN, J. D. (Ed.) **Cutting and grinding fluids: selection and application.** Dearbon – Michigan, SME, Second Edition, 1992, p. 119-135, ISBN: 0-87263-423-X.
62. SILVA, E. J. **Análise da influência dos tipos de fluidos de corte e rebolo na retificação do aço SAE HVN-3.** Dissertação de mestrado – UNESP, Bauru, SP, 2000, p. 35-44.
63. SILVA, J. C. L., et al. **Pesquisa bibliográfica: retificação em geral e com rebolos de nitreto de boro cúbico.** Florianópolis, 1995. 1º Relatório do convênio LMP-Bosch.
64. SILVA, C. E., COELHO, R. T. **Dressamento de rebolos para aplicações de precisão.** Revista Máquinas e Metais, Brasil, 1998, p. 100 – 111.
65. SILVA NETO, J. C., SILVA, M. B. **Retificação superabrasiva e convencional de aço rápido.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXVII, nº 425, junho, 2001, p. 152-161.

66. SME – Society of manufacturing engineers. Tool and Manufacturing Engineers Handbook: a reference book for manufacturing engineers. 4. ed. 1988.
67. SOARES, D. D., OLIVEIRA, J. F. G. **Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais**. Revista Máquinas e metais, Ano XXXVIII, nº 436, maio, 2002, p. 140 - 157.
68. SREEJITH, P. S., NGOI B. K. A. **Dry machining: machining of the future**. Journal of Materials Processing Technology, 2000, p. 287 – 291.
69. STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. Ed. da UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1992.
70. TABESH, A. D. **Important characteristics of sucessful aplications of CBN production grinding**. Abrasive Engineering Society, 1990, p. 68 – 94.
71. TABORGA, A. R. M. **Análise e Monitoramento da Retificação do Ferro Fundido Nodular com Rebolos Convencionais**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2002.
72. TABORGA, J. D. M. **Análise e Monitoramento da Retificação do Ferro Fundido Nodular com Rebolos de Nitreto de Boro Cúbico (CBN)**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2002.
73. TAWAKOLI, T. **Technologische Voraussetzungen und theoretische Grundlagen fuer das Hochleistungsschleifen**. Industrie Diamant Rundschau, 1990, p. 105 - 112.
74. TEIXEIRA, C. R., SCHROETER, R. B., WEINGAERTNER, W. L. **Aspectos ecológicos nos processos de usinagem**. Disponível em: <<http://cimm.uol.Br/curiosidades/cur10.h>>. Acesso em: 2000.
75. TÖNSHOFF, H. K., ALTHAUS, P. G., NÖLKE, H. H. **Der Einfluß des Kühlschmierstoffes auf das Verschleißverhalten**. Tribologie + Schmierungstechnik, 32. Jahrgang, 1985, p. 293 – 298.

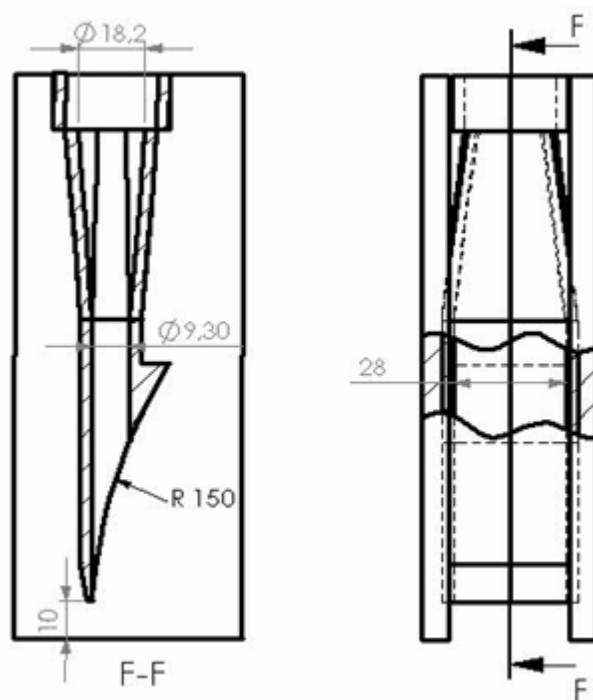
76. TÖNSHOFF, H. K., KARPUSCHEWSKI, B., MANDRYSCH, T. **Grinding Process Achievements and their Consequences on Machine Tools Challenges and Opportunitites.** Annals of the CIRP, vol. 47, n° 2, 1998, p. 651-668.
77. VIEIRA JÚNIOR, M. **Metodologia para determinação das condições de usinagem e de operação no processo de retificação.** Dissertação de mestrado – USP, São Carlos, SP, Brasil, 1992.
78. VIEIRA JÚNIOR, M., LIBARDI, R., CANCELIERI, H. A., LIMA, A. **Como o calor pode afetar a integridade superficial das peças.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXV, n° 397, Fevereiro, 1999, p. 28-36.
79. WAKUDA, M., INASAKI, I. **Detection of malfunctions in grinding processes.** Proceedings of the 4th World Meeting of Acoustic Emission, ANST, Boston, MA, 1991, p. 494-501.
80. WEBSTER, J. A. **Selection of coolant type and application technique in grinding.** Supergrind, University of Connecticut, USA, 1995, p. 205-220.
81. WEBSTER, J. A. **Optimizing coolant application systems for high producing grinding.** Abrasive Magazine, October./November, 1999, p. 34-41.
82. WEINGÄRTNER, E. **Retificação do Ferro Fundido Nodular com Rebolos de CBN a Altas Velocidades de Corte.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2005.
83. WEINGAERTNER, W. L., TABORGA, A. R. M., TABORGA, J. D. M. **Análise dos danos térmicos na retificação.** In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, ABM, vol. 14, 2001, p. 334-342.
84. WINTER. **Retificação.** Apostila de treinamento técnico da Empresa Winter, Jundiaí, SP, Brasil, 2004.

85. WINTER. **Grinding with diamond and CBN**. Winter diamond tools and CBN tools, 1. ed.1988.
86. WITTMANN, M., HEINZEL, C., BRINKSMEIER, E. **Optimierung der kühlsmiestoffzufuhr durch strömungsvisualisierung beim schleifen**. Proceedings of the 12th International colloquium on tribology, 2000 – Plus, s. 853 – 866, Technische Akademie Esslingen, Esslingen, 11 – 13, Januar, 2000.
87. YASUI, H., NAKAZONO, H., HOSOKAWA, A., KURUSU, M. **A New Efficient Dressing Method of the Resin Bond CBN Wheel**. Int. Japan Soc. Prec. Eng. vol. 25, n° 2, 1991, p. 98 – 99.
88. YEGENOGLU, K., FISCHBACHER, M. **Novos desenvolvimentos para melhorar a eficiência dos rebolos**. Máquinas e Metais, n° 456, Janeiro, 2004, p. 68 – 77.
89. YOSHIDA, S. **O processo de retífica e sua implicação no resultado do tratamento térmico**. Disponível em: <<http://www.brasimet.com.br/artigos/retifica.pdf>>. acesso em: mar. 2004.

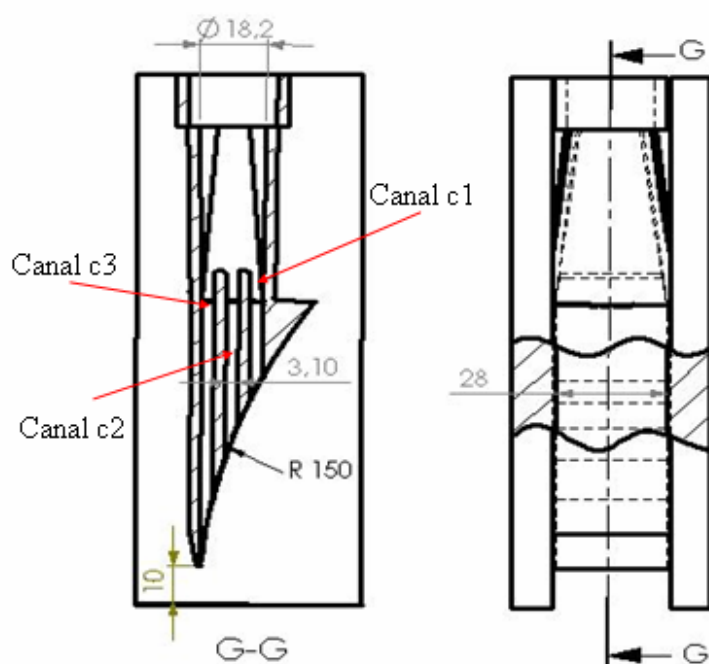
ANEXOS

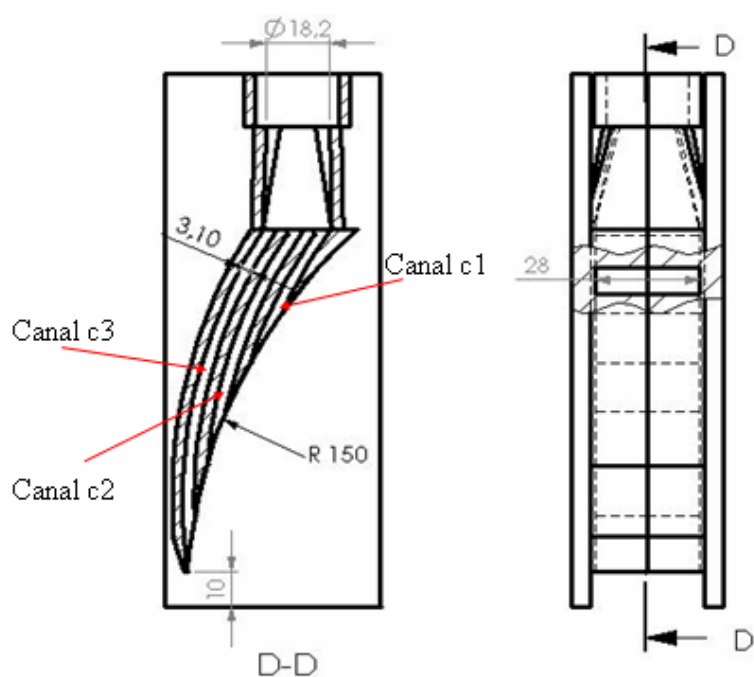
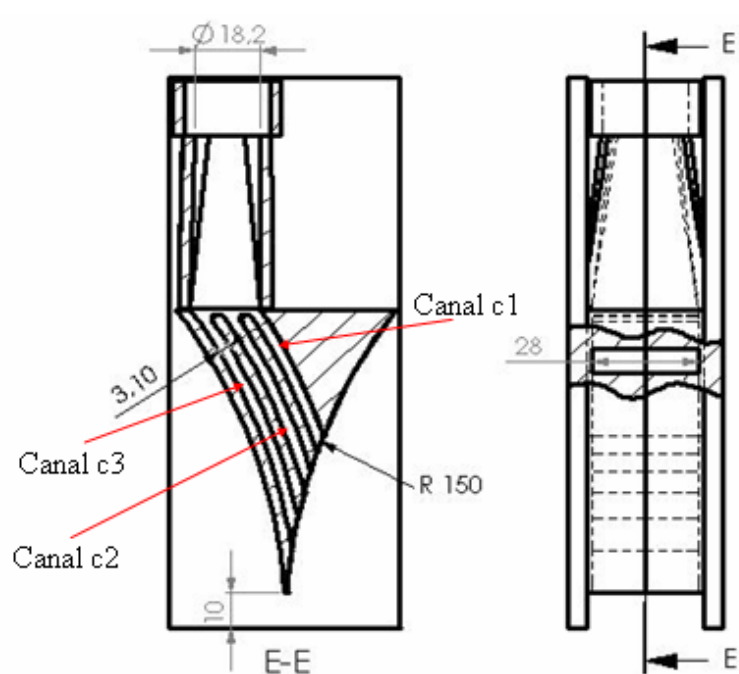
ANEXO A – Desenho das sapatas

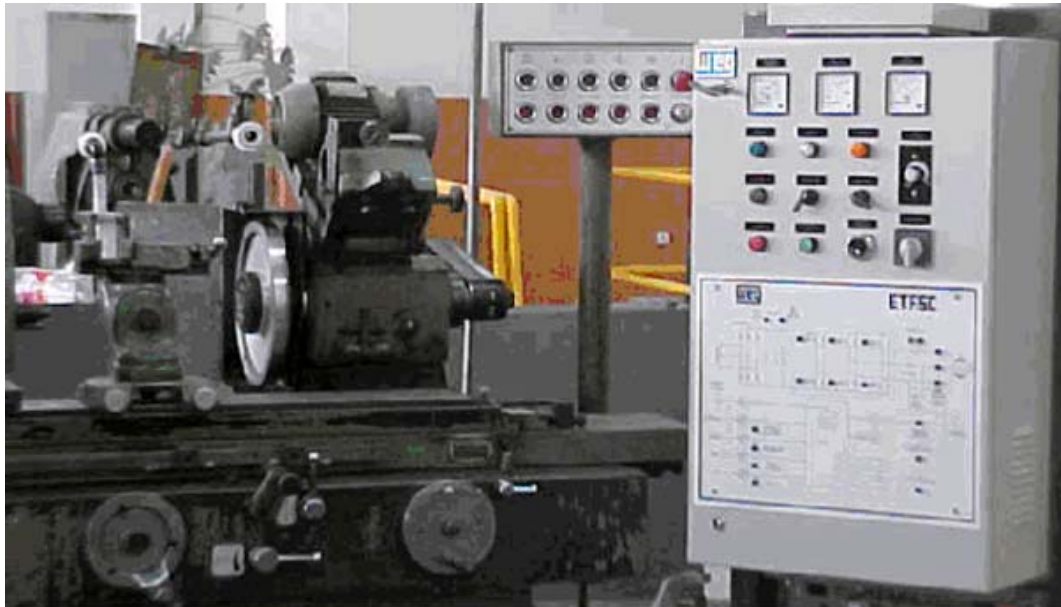
Tubeira A tipo sapata de canal simples



Tubeira B tipo sapata reta com três canais



Tubeira C tipo sapata cônica com três canais**Tubeira D tipo sapata convexa com três canais**

ANEXO B – Máquina retificadora e inversor de frequência

ANEXO C – Sistema de aquisição de imagens

Câmera CCD

A câmera CCD possui uma taxa de aquisição de 100 fps (completo) ou 4000 fps (parcial) e um conector IEEE-1394 (*FireWire*). Circuitos eletrônicos que permitem acesso aos dados da câmera em alta velocidade. A taxa de aquisição de imagens e demais características de operação são configurados utilizando um software próprio em C++. O software em C++ permite operar a câmera Basler, configurá-la e gravar um vídeo no formato **avi** para posterior análise.

As principais funções desenvolvidas foram:

- a) Iniciar e parar a gravação dos dados;
- b) Definir brilho, ganho e contraste da imagem;
- c) Definir o número de imagens que serão gravadas;
- d) Gravar a sequência de imagens no formato **avi**;
- e) Permite fazer um zoom na imagem durante a aquisição;

A câmera possui uma memória flash de 8 MB que armazena até 24 imagens, permitindo que a câmera adquira imagens em uma taxa constante.

O sensor de imagem digital tem a função de transformar os sinais luminosos em sinais elétricos correspondentes, digitalizá-los e disponibilizá-los para posterior processamento de imagem.



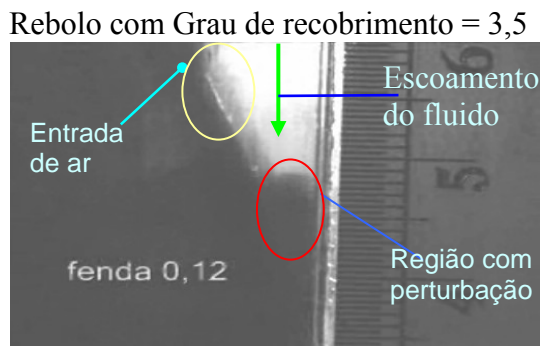
Para a coleta de dados existe um programa que permite iniciar e parar a gravação dos dados, definirem o brilho, o ganho e o contraste da imagem, definir o número de imagens que serão gravadas, gravarem a sequência de imagens no formato **avi** e fazer um zoom na imagem durante a aquisição.

ANEXO D – Comportamento do fluido no interior da tubeira tipo sapata de canal simples para diferentes topografias de rebolo

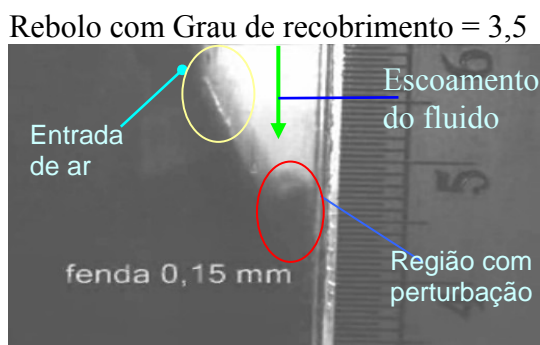
As fotos abaixo mostram a diferença de comportamento do fluido no interior da tubeira tipo sapata A de canal simples quando variamos a topografia do rebolo.



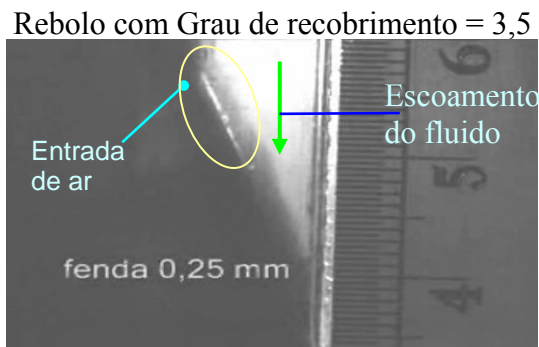
a) Comportamento do fluido no interior da tubeira A de canal simples para velocidade de 100 m/s, vazão 10 l/min e abertura da fenda rebolo/tubeira 0,10 mm



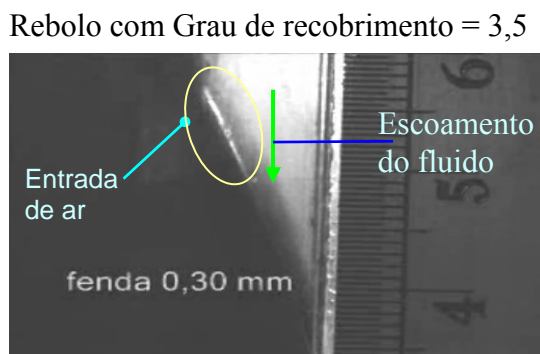
b) Comportamento do fluido no interior da tubeira A de canal simples para velocidade de 100 m/s, vazão 10 l/min e abertura da fenda rebolo/tubeira 0,12 mm



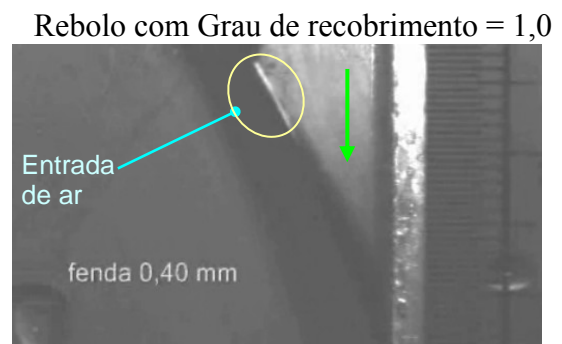
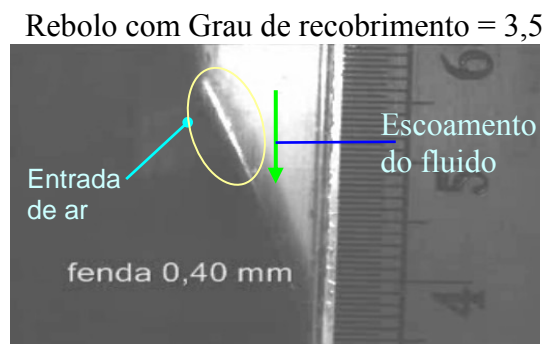
c) Comportamento do fluido no interior da tubeira A de canal simples para velocidade de 100 m/s, vazão 10 l/min e abertura da fenda rebolo/tubeira 0,15 mm



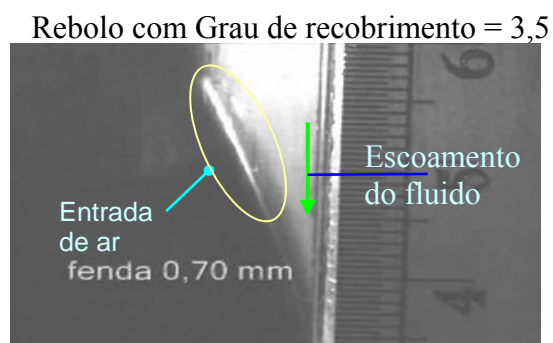
d) Comportamento do fluido no interior da tubeira A de canal simples para velocidade de 100 m/s, vazão 10 l/min e abertura da fenda rebolo/tubeira 0,25 mm



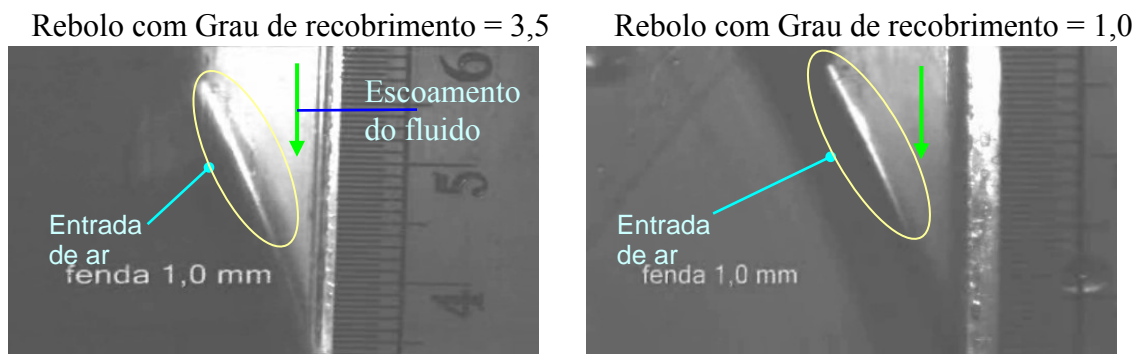
e) Comportamento do fluido no interior da tubeira A de canal simples para velocidade de 100 m/s, vazão 10 l/min e abertura da fenda rebolo/tubeira 0,30 mm



f) Comportamento do fluido no interior da tubeira A de canal simples para velocidade de 100 m/s, vazão 10 l/min e abertura da fenda rebolo/tubeira 0,40 mm



g) Comportamento do fluido no interior da tubeira A de canal simples para velocidade de 100 m/s, vazão 10 l/min e abertura da fenda rebolo/tubeira 0,70 mm



- h) Comportamento do fluido no interior da tubeira A de canal simples para velocidade de 100 m/s, vazão 10 l/min e abertura da fenda rebolo/tubeira 1,00 mm

ANEXO E - Instruções para leitura da tese

A leitura desta tese de doutorado pode ser realizada em cópia escrita ou em cópia eletrônica gravada em CDR. O CDR que acompanha a Tese possui duas cópias da Tese e 44 (quarenta e quatro) filmes. As cópias da tese são denominadas: Cópia Drive D e Cópia Drive E. Os filmes são numerados de 1 a 44 (filme 1, filme 2,..., filme 44).

Para leitura eletrônica é necessário ter instalado os programas Adobe Reader 7.0 ou similar e Windows Media Player.

Para poder ler a tese através da cópia eletrônica e visualizar os filmes que estão em seu corpo é necessário colocar o CDR no drive de CD-ROM e abrir a cópia com o mesmo nome que o drive do CD-ROM tem no windows. Por exemplo: O computador usado para a leitura do trabalho possui disponível para leitura de CDR o drive D, então o leitor terá que abrir a cópia com nome “Cópia Drive D.pdf”.

Os filmes que acompanham a tese podem ser visualizados de duas formas:

- 1- Diretamente do CDR;
- 2- No corpo do trabalho (item 4.5.1 até 4.5.6), colocando o mouse sobre o número do filme (1, 2,..., 44) ou sobre as figuras indicadas (Figura 4.15 até Figura 4.40) e pressionando o botão esquerdo do mouse.